

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки приборостроение  
Отделение школы (НОЦ) отделение контроля и диагностики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы	
<b>Разработка аппаратно-программного комплекса для УЗ томографии на основе В-развёртки</b>	

УДК 620.179.162:004.352

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б4А	Карасев Александр Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Капранов Борис Иванович	д.т.н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын В. В.	Кандидат экономических наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	к.т.н		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мойзес Б. Б.	к.т.н		

Томск – 2018г.

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения, с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
	<b><i>Универсальные компетенции</i></b>
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение  
Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Суржиков А. П.  
(Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1Б4А	Карасев Александр Андреевич

Тема работы:

Разработка аппаратно-программного комплекса для УЗ томографии на основе В-развертки	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	9729/С от 11.12.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:	7.06.2018
--	-----------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследований являются ультразвуковая томография на основе В – развертки. Предмет исследований – аппаратно-программный комплекс для ультразвуковой томографии на основе В – развертки. Цель работы – Разработать аппаратно-программный комплекс для ультразвуковой томографии на основе В-развертки.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разработать механизм для перемещения ПЭП по схеме В – скана.</li> <li>2. Организовать связь механизма с компьютером.</li> <li>3. Сформировать продольной томограммы изделия.</li> </ol>
<b>Перечень графического материала</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Схемы</li> <li>2. Изображения</li> <li>3. Графики</li> </ol>

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицын Владислав Владимирович
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	11.09.17
---	----------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Капранов Б. И.	к.т.н.		11.09.2017

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1Б4А	Карасев Александр Андреевич		11.09.2017

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б4А	Карасеву Александру Андреевичу

Тема: Исследование скорости звука в твёрдых телах

Институт	Электронного обучения	Отделение	Контроля и диагностики
Уровень образования	Бакалавриат	Направление / специальность	12.03.01 Приборостроение

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	В исследовании задействованы 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 380 тысяч рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	-Данная НИР новая, следовательно, нормы и нормативы расходования ресурсов отсутствуют  -Минимальный размер оплаты труда (на 2018 год) составляет 9489 руб.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	-Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	- Техничко-экономическое обоснование НИ
2. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	- Оценка научно-технического уровня следования, - Оценка рисков

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын Владислав Владимирович	Кандидат экономических наук, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б4А	Карасев Александр Андреевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б4А	Карасеву Александру Андреевичу

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Бакалавр	Направление/ специальность	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Целью данной ВКР является разработка (усовершенствование) аппаратно-программного комплекса для УЗ томографии на основ В-развёртки.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Отклонение показателей микроклимата в помещении Повышенный уровень ультразвука Недостаток или отсутствие естественного света Электрический ток Нервно-психическое перенапряжение
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	– анализ влияния процесса исследования на окружающую среду – анализ влияния объекта исследования на окружающую среду
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС – пожар; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В	К.Т.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б4А	Карасев Александр Андреевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 90 с., 35 рис., 9 табл., 25 формул, 21 источник.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковая томография, ультразвуковой контроль.

Объектом исследований являются ультразвуковая томография на основе В – развертки.

Предмет исследований – аппаратно-программный комплекс для ультразвуковой томографии на основе В – развертки.

Цель работы – Разработать аппаратно-программный комплекс для ультразвуковой томографии на основе В-развертки.

Разработать механизм перемещения пьезопреобразователя, особенностью которого будет является реализация сканирования по заданному маршруту сканирования.

Произвести согласование скорости механизма перемещения и вывода обновленной полученной информации на экран.

Проанализировать вредные и опасные факторы, которые могут возникать при эксплуатации проектируемого решения, и провести расчеты в финансовом менеджменте и ресурсоэффективности.



## Оглавление

Введение.....	11
1 Обзор литературы.....	12
1.1 Эхо-импульсный метод.....	14
1.2 Эхо-зеркальный метод.....	15
1.3 Теневой метод.....	16
1.4 Зеркально-теневой метод.....	17
1.5 Дельта – метод.....	17
1.6 Теоретические основы ультразвуковой дефектоскопии.....	18
2 Томография.....	21
2.1 Задачи акустической интроскопии.....	22
2.2 Пьезоэлектрические преобразователи.....	23
2.3 Прямой преобразователь.....	25
2.4 Наклонные преобразователи.....	26
2.5 Раздельно-совмещенный преобразователь.....	27
2.6 Иммерсионный преобразователь.....	28
2.7 Характеристики пьезоэлектрического преобразователя.....	28
2.8 Излучающие поля ультразвуковых преобразователей.....	30
3 Типы и формирование ультразвуковых изображений.....	31
3.1 В – scan.....	34
3.2 Визуализация полученных данных при помощи алгоритма В – развертки.....	37
3.3 Алгоритм восстановления изображения среза.....	40
3.4 Практическая рекомендация по работе в режиме В – scan.....	44
3.5 Описание механизма перемещения.....	45
3.5 Настройка экспериментальной установки.....	49
3.6 Проведение контроля.....	51
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
4.1 Техничко-экономическое обоснование НИР.....	57
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	57

4.3 Планирование работ по научно-техническому исследованию.....	60
4.4 Разработка графика научного исследования.....	63
4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	67
4.6 Расчет материальных затрат НТИ.....	68
4.7 Основная заработная плата исполнителей темы.....	70
5 Социальная ответственность.....	74
5.1 Производственная безопасность.....	74
5.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	75
5.3 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследования.....	76
5.4 Экологическая безопасность.....	82
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	82
5.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	85
Заключение.....	88
Список использованных источников.....	89

## **Введение**

Акустический неразрушающий контроль – контроль изделий, основан на применении упругих колебаний, которые возбуждаются или возникают в ОК. Ультразвуковой неразрушающий контроль в данный момент является одним из самых распространенных видов НК и находит применение во всех сферах промышленности. Одно из направлений развития в УЗК – реконструктивная ультразвуковая томография, одной из главных задач которой, является повышение информативности, которая включает в себя визуализацию результата контроля. Реконструкция подразумевает получение массива данных полученных экспериментальным путем, а так же их совместную математическую обработку для создания изображения сечения объекта на заданной глубине.

Метод с использованием перемещающегося преобразователя по заданной линии сканирования в пределах зоны контроля служит для получения первичной информации, а так же является одним из наиболее развивающихся методов, в результате которого формируется массив эхо-сигналов от отражателей. Таким образом, каждый проход по линии сканирования дает эхо-изображение сечения объекта контроля. Данный метод сканирования получил название «В – scan» и в настоящее время находит практическое применения в ультразвуковой томографии. На сегодняшний день, такой функцией обладают практически все современные УЗ дефектоскопы, главные различия которых заключаются лишь в точностных характеристиках, схемах проведения контроля, диапазонах контролируемых толщин и другими параметрами.

**Цель работы:** разработать механизм для перемещения ПЭП по схеме В – scan, организовать связь механизма с компьютером, хранение и обработку массива экспериментальных данных, формирование продольной томограммы изделия.

## 1 Обзор литературы

Метод УЗ дефектоскопии материалов впервые был разработан и практически осуществлен в Советском Союзе в 1928—1930 гг. проф. С. Я. Соколовым.

Ультразвуковая дефектоскопия на сегодняшний день является одним из самых распространенных методов в НК. Опираясь на отчет доктора Ферстера, диаграмма распределения по объемам использования методов в НК, выглядит так, как показано на рисунке 1:

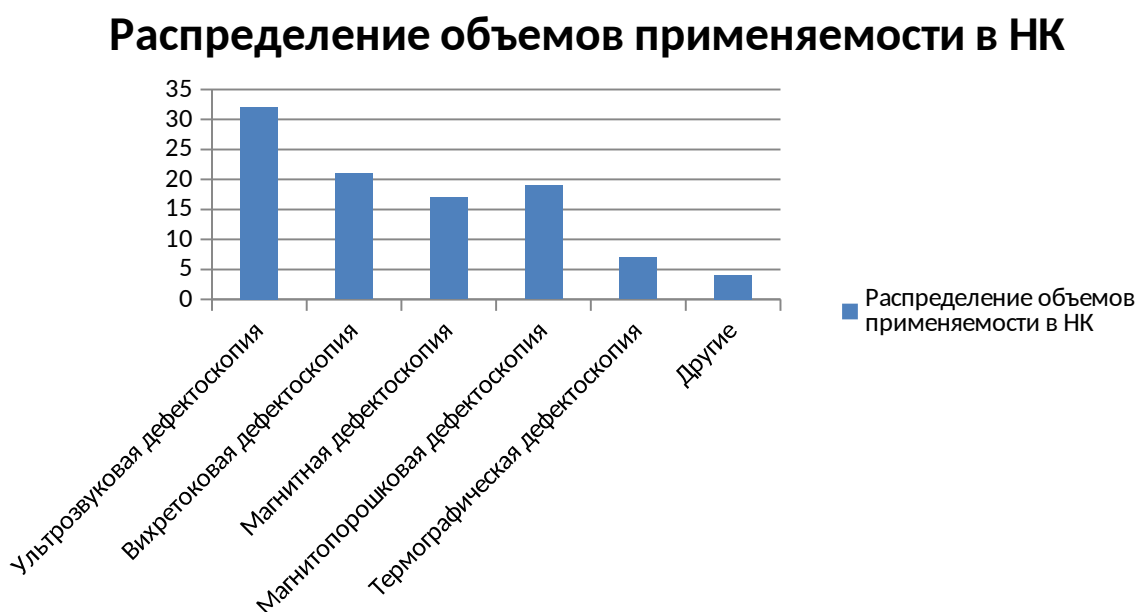


Рисунок 1 – Объемы использования основных видов неразрушающего контроля

Исходя из предоставленной выше диаграммы, можно сделать вывод о том, что ультразвуковая дефектоскопия занимает лидирующее место в рейтинге. Так как применяемость УЗ в НК составляет почти треть всего объема, а именно 32%. Данный показатель объясняется большим количеством объемов работ, над которыми проводят контроль непосредственно во время эксплуатации: трубопроводы, металлоконструкции и тд [1].

Значительная часть УЗ контроля приходится на ответственные части объекта контроля, такие как сварные соединения, толщинометрия стенок ОК,

а так же на поиск подповерхностных дефектов. Для сварного соединения контроль околошовной зоны осуществляется при помощи наклонного преобразователя, с прилегающей поверхности. В свою очередь, контроль изделия осуществляется прямыми и отраженными лучами от донной стенки объекта контроля.

Средствами ультразвукового контроля, можно получить параметры дефекта, такие как условные размеры, геометрическую форму, координаты и расположение дефекта внутри объекта контроля.

В связи с тем, что происходит постоянное повышение требований к безопасности на производствах, происходит одновременное и усовершенствование характеристик ультразвуковых дефектоскопов, параметры массы и габаритов УЗ приборов, методик проведения контроля, но основными результатами о пригодности изделия все так же служат основной параметр – время. Так же со временем появились новые функции, к которым можно отнести связь с ПК, для цифровой обработки и хранения результатов контроля, регулировка чувствительности, возможность проведения УЗ томографии на основе В – и С – сканирования.

УЗ томография активно развивается с 70-х и 80-х годах, так к примеру, в В – развертке полученные эхо-сигналы визуализируются в плоскости как вид сбоку, в то время, как С – развертка дает изображения вида сверху. Но из-за отсутствия обработки эхо-сигналов, полученные данные получались размытыми, но визуально воспринимались лучше, чем А – скан. В начале 90-х годов были созданы методы для повышения качества получаемых изображений.

Выделяют активные и пассивные методы контроля. К пассивным, относятся методы вибродиагностики, акустической эмиссии, шумодиагностики, а к активной методы ультразвуковой дефектоскопии. Классификация данных методов приведена в таблице 1.

Таблица 1. Методы ультразвуковой дефектоскопии.

Активные														
Ультразвуковые волны бегущих волн										Спектральные				Импеданс.
Основаны на прохождении			Комбинированные			Основан. на отражении				Вынужд. колеб.		Свобод. колеб.		
Теневой амплитудный	Теневой временной	Велосиметрический	Зеркально-теневой	Эхо - теневой	Эхо - сквозной	Эхо-метод	Эхо-зеркальный метод	Дельта-метод	Дифракционно-временной	Ревверберационный	Толщинометрия	Локальный	Интегральный	
												Локальный	Интегральный	

Рассмотрим основные методы для ультразвуковой дефектоскопии:

### 1.1 Эхо-импульсный метод

Данный метод имеет широкое применение, который заключается в направлении звуковой энергии от ПЭП на объект контроля и регистрации отраженной обратно волны от внутреннего сечения объекта контроля. В таком методе для излучения и приемника акустических волн может быть использован либо два ПЭП (излучатель и приемник), либо один ПЭП, являющийся одновременно излучателем и приемником.

Однако у такого метода, использования одного ПЭП, есть недостаток. Он заключается в том, что если дефект расположен близко к поверхности ОК, то сигнал от него будет приходить раньше, чем закончится зондирующий импульс. А это значит, что сигнал будет не замечен на фоне зондирующего импульса, поэтому дефект не обнаруживается. Данное явление называется мертвой зонной.

Достоинствами данного метода является то, что при контроле достаточно иметь односторонний доступ к изделию, так же у метода большая чувствительность к внутренним дефектам и большая точность в определении их координат

Этот метод находит свое применение в различных методах ультразвукового контроля, таких как контактный, пошаговое зондирование и т.д.

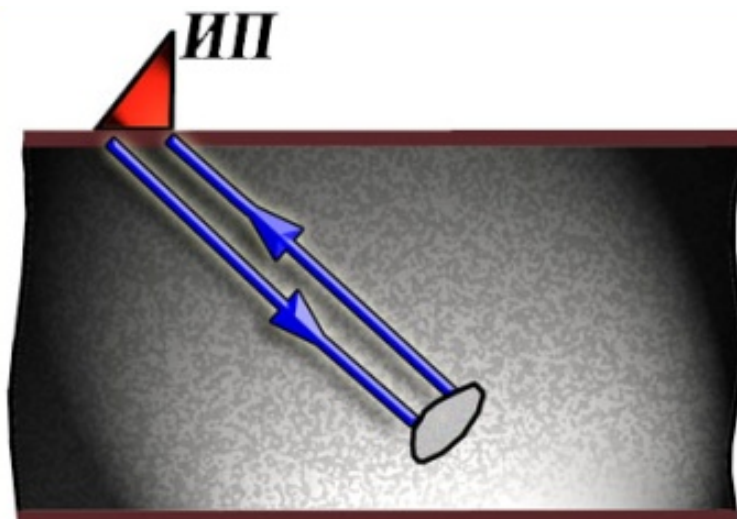


Рисунок 2 – пример эхо-импульсного метода

## 1.2 Эхо-зеркальный метод

Эхо-зеркальный метод подразумевает использование двух преобразователей расположенных с одной стороны объекта контроля. Сгенерированные излучателем ультразвуковые колебания проходят во внутрь ОК, отраженные от дефекта акустические волны регистрируются приемником.

Основное преимущество эхо-зеркального метода — высокая выявляемость плоскостных дефектов и возможность оценки их формы. Ограничения данного метода: применение только для металла больших толщин, а именно более 40 мм., а так же сравнительно большой пороговый размер дефектов округлой формы (диаметр не менее 3 мм).

Такой метод находит свое практическое применение в дефектоскопии только тогда, когда дефект расположен перпендикулярно исследуемой поверхности ОК.

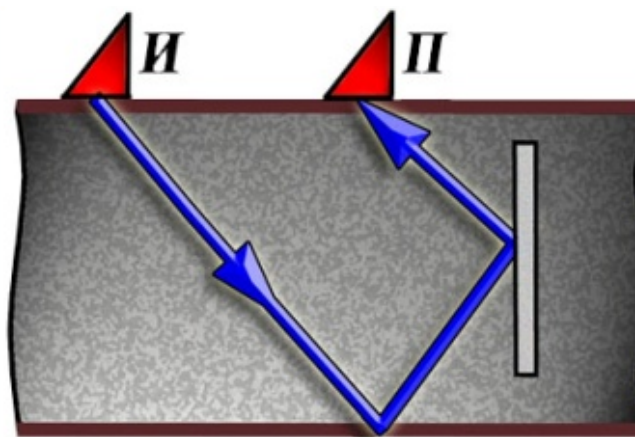


Рисунок 3 – пример эхо-зеркального метода.

### 1.3 Теневой метод

Метод, который заключается в использовании двух преобразователей расположенных по разные стороны ОК. В таком методе один преобразователь является излучателем и генерирует акустические волны, которые распространяются в объекте контроля. Вторым преобразователем является приемник, который располагается строго по направлению движения волны, переданной излучателем. Признаком дефекта является уменьшение амплитуды УЗ колебаний, что говорит о том, что УЗ пучок перенаправляется дефектом.

Недостатки метода – необходимость двустороннего доступа к изделию и малая точность оценки координат дефектов, достоинство метода - высокая помехоустойчивость.

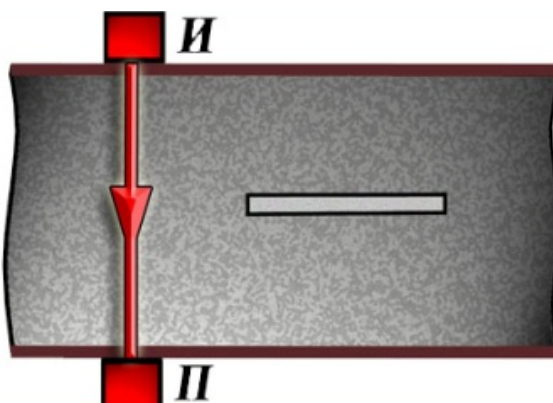


Рисунок 4 – пример теневого метода.



## 1.4 Зеркально-теневой метод

По своей сути является теневым методом, однако преобразователи располагаются на одной стороне ОК, регистрируя при этом не прямой поток УЗ волн, а отраженный от второй поверхности (донный импульс). Признаком дефекта является уменьшение амплитуды отраженных колебаний в ОК. Данный метод не требует двустороннего доступа к контролируемому изделию, что позволяет более достоверно выявлять корневые дефекты в стыковых швах. Так же зеркально – теневой метод помехоустойчив и применяется для изделий небольшой толщины. Однако точность определения координат дефекта невысока.

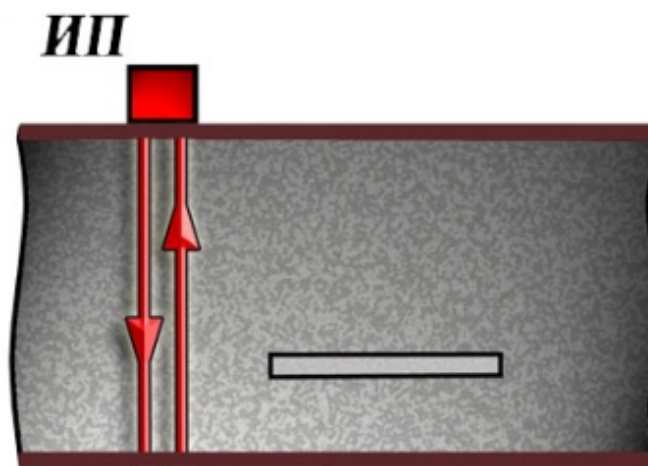


Рисунок 5 – пример зеркально-теневого метода

## 1.5 Дельта – метод

Принципом метода является использование ультразвуковой энергии, переизлученная дефектом. При попадании на дефект поперечной ультразвуковой волны, она частично отражается зеркально (по закону Снелля), частично преобразуется в продольную и частично переизлучает дифрагированную волну. Продольная волна распространяется в ОК перпендикулярно к нижней стенке. Отражаясь от нее, волна улавливается прямым преобразователем (приёмником). Так же приемником улавливается и компонента продольной дифрагированной волны, исходящей от верхнего края дефекта.

К недостаткам данного метода можно отнести сложность расшифровки принятых сигналов, при контроле изделий толщиной менее 15мм., трудности к настройке чувствительности и оценке размеров дефекта.

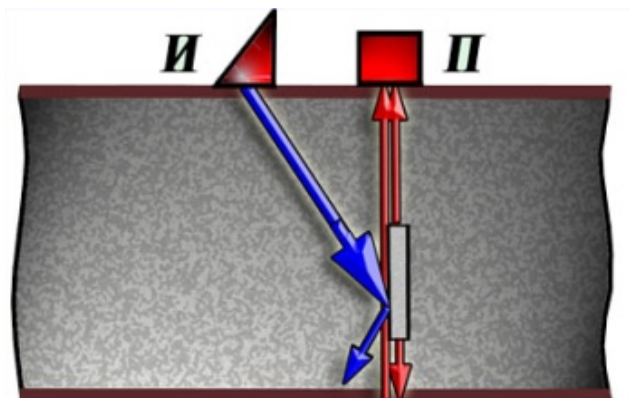


Рисунок 6 – Пример дельта-метода.

Главной проблемой всех методов является то, что необходимо подбирать частоту при контроле, это обуславливается тем, что если длина волны будет больше размера дефекта, то будет происходить огибание и дефект не обнаружится. Однако необходимо так же учитывать и размер зерен металла, так при большой величине зерен, будет происходить затухание колебаний. Это происходит за счет пропорциональности длины волны и частоты колебаний.

### 1.6 Теоретические основы ультразвуковой дефектоскопии

Ультразвуковая дефектоскопия является одним из методов акустического неразрушающего контроля, использующим механические колебания упругой среды, частота которых лежит за порогом слышимости человеческого уха, т.е. выше 20 кГц. Обычно для ультразвукового контроля применяют колебания частотой 0,5-10 МГц.

Звуковые волны распространяются в среде с определенной скоростью в заданном направлении. При распространении акустических волн в среде частицы среды совершают колебания относительно точек равновесия. Распространение волн происходит от частицы к частице. Расстояние между частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны  $\lambda$ .

Длина волны  $\lambda$ , скорость распространения  $c$  и частота колебаний  $f$  связаны соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{f} (1)$$

В ультразвуковом контроле, инспектор должен принять решение о выборе частоты преобразователя который будет использован для управления длиной волны. Используемая длина волны оказывает значительное влияние на обнаружение несплошности. Главное правило в том, чтобы несплошность была больше половины длины волны, для уверенного обнаружения дефекта.

Чувствительность и разрешение, это два термина, которые часто используются в ультразвуковом контроле для описания способности метода обнаруживать дефекты. Чувствительность – это способность обнаруживать небольшие несплошности. Она обычно увеличивается с более высокой частотой (более короткие длины волн). Разрешение – это способность системы обнаруживать дефекты близкие друг к другу в материале.

Разрешение, как правило, так же увеличивает частоту [2].

Таким образом, выбор оптимальной частоты часто предполагает баланс между благоприятным и неблагоприятным результатом контроля.

С увеличением частоты, звук имеет тенденцию рассеиваться от крупных зерен в материале и от небольших несплошностей. Литые материалы часто имеют крупные зерна и следовательно требуют более низких частот для оценки этих продуктов. Кованные изделия с направленной структурой зерна обычно проверяют с помощью высокочастотных преобразователей.

Волна при прохождении в объект, ослабевает из-за поглощения энергии в микроструктуре материала. При поглощении энергия акустической волны преобразуется в тепловую энергию, а при рассеянии остается энергией акустической волны, но уходит из направленно распространяющейся волны.

Поглощение обусловлено вязкостью (внутренним трением), упругим гистерезисом (т. е. различной упругой зависимостью при расширении и

сжатии) и теплопроводностью. Рассеяние происходит из – за наличия в среде неоднородностей (с отличными от среды плотностью и упругими свойствами), размеры которых соизмеримы с длиной волны. Такими неоднородностями могут быть капли воды или пыль в газе, взвешенные частицы или пузырьки воздуха в воде.

При попадании волны на границу раздела двух сред, звуковая волна будет частично отражаться и частично проникать в другую среду, в соответствии с законом Снелля. Данный физический принцип является основой ультразвуковой дефектоскопии. Иными словами, ультразвуковые волны отражаются от несплошностей в объекте контроля и путем анализа эхо- сигналов опытный оператор может обнаружить скрытые внутренние дефекты.

Ультразвуковые волны, которые используются для обнаружения дефектов, генерируются и принимаются в ультразвуковых преобразователях. Ультразвуковой преобразователь использует пьезо пластину, которая преобразует электрические импульсы в ультразвуковые волны и наоборот, что является прямым и обратным пьезоэффектом.

Сущность прямого пьезоэффекта заключается в электрической поляризации пьезоэлектриков, проявляющейся появлением электрических зарядов на их поверхности, под действием механической деформации.

Обратный пьезоэффект заключается в возникновении в пьезоэлектриках механического напряжения или деформации под действием электрической поляризации.

Для передачи ультразвука от преобразователя в объект контроля и используются контактные жидкости. Необходимость их использования диктуется тем, что ультразвук плохо распространяется в воздухе. Даже очень тонкий слой воздуха между преобразователем и поверхностью объекта контроля не позволяет удовлетворительно передавать ультразвуковую энергию и делает ультразвуковой контроль невозможным. В качестве контактных жидкостей может быть вода, машинное масло, смазка и другие.

## 2 Томография

Томография (в переводе с древнегреческого — сечение) — получение послойного изображения внутренней структуры объекта. В классической интерпретации под томографией подразумевается метод рентгенологического исследования, при котором получается изображение выбранного слоя, лежащего на определенной глубине исследуемого объекта. Метод впервые предложил французский врач Андрэ Бокаж спустя несколько лет после открытия рентгеновских лучей. Метод заключался в использовании трёх компонентов рентгенографии: рентгеновской трубки, рентгеновской плёнки и объекта исследования, два из которых перемещались относительно третьего компонента, в качестве которого традиционно выступал объект контроля. В основе метода лежит интегральное преобразование предложенное в 1917 году австрийским математиком Иоганном Радоном, используя которое появилась возможность определять исходную функцию, если известно ее интегральное преобразование. Наибольшее распространение получил прием, использующий согласованное перемещение рентгеновской трубки и кассеты с плёнкой в противоположных направлениях, а исследуемый объект при этом оставался неподвижным. При синхронном перемещении рентгеновской трубки и пленки на ней четким получается только выбранный слой, потому что относительно плёнки только он остаётся неподвижным, всё остальное размывается, практически не влияя на полученное изображение. В настоящее время этот метод именуется классической томографией или линейной томографией. В последнее время стали появляться работы направленные на улучшение качества получаемого изображения.

Ультразвуковая томография развита менее рентгеновской томографии. Работы по ультразвуковой томографии основаны на получении изображения за счет отражения упругих волн от неоднородностей, что эквивалентно получению В,С-скана[3].

## 2.1 Задачи акустической интроскопии

Интроскопия (лат. intro — внутри, др.-греч. σκοπέω — смотрю; дословный перевод внутривидение) — неразрушающее (неинвазивное) исследование внутренней структуры объекта и протекающих в нём процессов с помощью звуковых волн (в том числе ультразвуковых и сейсмических), электромагнитного излучения различных диапазонов, постоянного и переменного электромагнитного поля и потоков элементарных частиц [4].

Исходя из определения, главной задачей интроскопии является обнаружение и определение отклонений от заданных свойств ОК. В ультразвуковом контроле, осуществление интроскопии происходит при помощи звуковых волн (на частотах от 10 Гц до 1000 МГц). УЗ волны могут проникать практически в любые изделия, такие как: пластмасса, металл, жидкости и т.д.

Для описания свойств объекта обычно вводят функции неоднородностей, которые будут отличны от нуля только лишь в местах дефекта. Следовательно, такие функции будут являться формой для визуализации неоднородностей (изображением).

Основной смысл в построении акустического изображения заключается в повышение информативности и предоставлении данных о состоянии ОК.

При помощи ультразвука, можно сформировать 3 типа изображений: голографическое, ортографическое и томографическое. Так голографическое изображении принято считать, что при попадании УЗ волны в объект контроля, происходит рассеивание волны, что дает объемное изображение при помощи визуализации изображения. Ортографическое изображение соответствует снимку плоскости (аналогично фотографии) и имеет отличительную особенность расположения плоскости ОК, она будет перпендикулярна направлению лучей [5]. Томографическое изображение соответствует «прозвучивание» плоскости объекта, которое будет

визуализировано при помощи В – и С – скана и отображать масштабное изображения характеристик слоя объекта. Таким образом томографическое изображение сопоставимо с сечением данного ОК. Такие изображения получают двумя способами. Первый – получение изображения непосредственно сканированием. Второй способ – реконструктивный, когда изображение получается из набора проекционных изображений [6].

## 2.2 Пьезоэлектрические преобразователи

Преобразование электрических импульсов в механические колебания и преобразование отраженных механических колебаний обратно в электрические импульсы является основой для ультразвукового контроля.

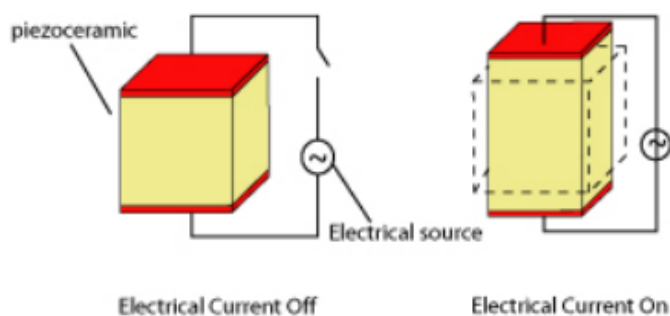


Рисунок 7 – воздействие электрического импульса на пьезопластину

Как правило, используют пьезоэлектрические преобразователи, в которых чувствительный элемент – пьезопластина. На нее подают электрические колебания от генератора дефектоскопа и под их действием она изменяется по толщине (рисунок 6). Прием происходит за счет обратного преобразования механических колебаний в электрические [7].

Толщина активного элемента определяется желаемой частотой преобразователя. Например, если в пластине возбудить колебания коротким электрическим воздействием, а затем предоставить ей возможность свободно колебаться, то колебания будут происходить на собственной частоте  $f$ . Она соответствует полуволновой толщине пластины  $h$ , т.е. равной половине длины волны в ее материале

$$h = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad (2)$$

Исходя из этого видно, что чем выше собственная частота, тем тоньше должна быть пластина.

Современные дефектоскопы комплектуются широким набором приемников и излучателей УЗ волн. Отличаются они по некоторому ряду признаков:

- первый признак – это способ контакта с изделием (контактные, щелевые, иммерсионные преобразователи);
- второй признак – это направление ультразвуковых колебаний к поверхности изделия (наклонные и прямые преобразователи);
- третий признак – это способ соединения с дефектоскопом, они бывают:
  - раздельные (один элемент выполняет роль излучателя, другой – приемника),
  - совмещенные (один и тот же элемент выполняет функции излучателя и приемника).

Основные типы преобразователей: прямые, наклонные, раздельно-совмещенные. Их основные конструктивные элементы:

- 1) пьезопластина;
- 2) демпфер, к которому приклеивается неизлучающая в ОК сторона пьезопластины и который способствует гашению (демпфированию) колебаний для получения короткого импульса;
- 3) Протектор, который предохраняет пьезопластину от повреждений
- 5) проводники, соединяющие электроды на плоскостях пьезопластины с корпусом и с внутренним проводником кабеля
- 4) катушка индуктивности
- 6) корпус
- 7) кабель
- 8) Преломляющая призма обеспечивает требуемый угол наклона



### 2.3 Прямой преобразователь

Прямой контактный преобразователь предназначен для излучения продольных волн, направленных нормально (т.е. под прямым углом) к поверхности ОК.

На поверхности пьезопластины методом вжигания, осаждения или напыления в вакууме наносят серебряные электроды, которые системой проводников 7 соединены с кабелем, а через него с дефектоскопом. Внешнюю обмотку кабеля и наружную сторону пьезопластины обычно соединяют проводником 5 с корпусом 6 преобразователя.

Примером практической конструкции преобразователя можно увидеть на рисунке 7.

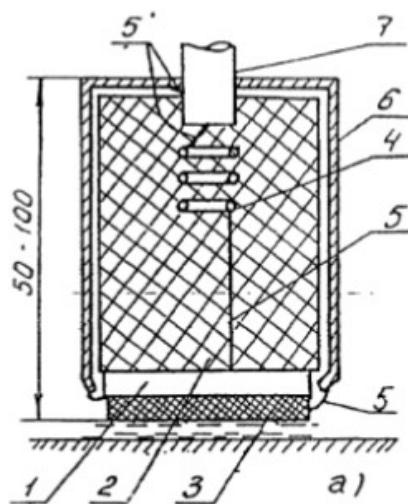


Рисунок 8 – прямой преобразователь

В преобразователе, демпфер изготовлен из эпоксидной смолы. К прилегающей пластине, часто вводят порошок из вольфрама или свинца в пропорции 1:12 по массе. Он повышает характеристический импеданс демпфера, а также увеличивает широкополосность преобразователя. Протектор 3 преобразователя должен обладать высокой износоустойчивостью, а так же обеспечивать высокую чувствительность преобразователя и стабильность акустического контакта с изделием.

Размеры пьезопластины подбирают с учетом поля излучения – приема. Увеличение ее диаметра приводит к сужению диаграммы направленности в дальней зоне, но и в то же время увеличивает

протяженность ближней зоны, где выявление дефектов затрудняется из-за наличия максимумов и минимумов сигнала. Лучше всего применять маленькие преобразователи для контроля тонких изделий, а большие преобразователи для контроля изделий больших толщин [8].

## 2.4 Наклонные преобразователи

Отличие наклонного преобразователя от прямого преобразователя - это наличие наклонной призмы:

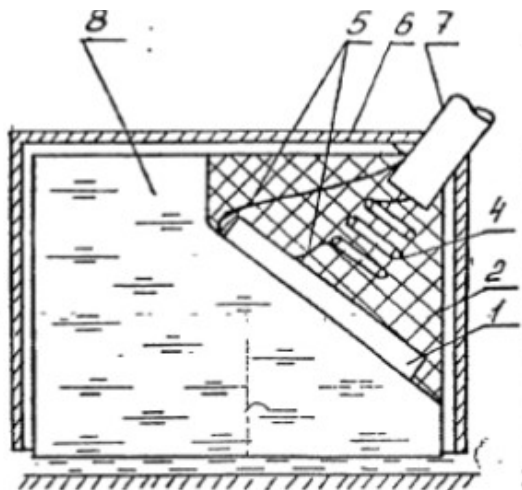


Рисунок 9 – Наклонный преобразователь

Пьезоэлемент излучает в призму продольные волны, которые на границе призмы с изделием преломляются и вследствие этого трансформируются в поперечные. Демпфер в наклонных преобразователях либо отсутствует, либо его делают из материала с малым акустическим сопротивлением, потому что там нет идущей в направлении к пластине отраженной волны. Пьезопластину прижимают к призме через слой контактной жидкости (масло) или приклеивают к ней. Призму наклонного преобразователя чаще всего изготавливают из оргстекла. Преломляющий угол выбирают так, чтобы в изделии возникали только поперечные волны. Особое внимание уделяется на то, чтобы не возбуждалась поверхностная волна, так как она вызовет появление интенсивных ложных сигналов от неровностей поверхности изделия [9].

## 2.5 Раздельно-совмещенный преобразователь

Раздельно-совмещенный преобразователь состоит из излучателя и приемника. Для определения оптимальных условий возбуждения поверхностных волн, волн в пластинах и стержнях требуется плавная регулировка угла наклона преобразователя.

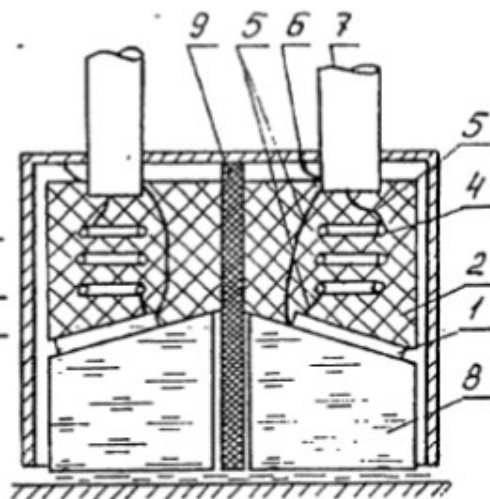


Рисунок 10 – Раздельно-совмещенный преобразователь

Изменяя углы призм 8 (от  $0^\circ$  до  $100^\circ$ ), высоту и расстояние между ними и размерами пьезоэлементов, можно изменять глубину прозвучивания и уменьшать мертвую зону до 1 – 2 мм.

Есть возможность обеспечить постоянную чувствительность к дефектам при различном расстоянии от поверхности. Преобразователям такого типа свойственен специфический вид помех, который связан с передачей сигнала от излучателя к приемнику с помощью поверхностных волн. Такие преобразователи применяют также как вариант наклонного преобразователя.

В таком случае призмы преобразователя выполняют так, чтобы обеспечить большой угол наклона общей оси преобразователя и значительно меньший (от  $0 - 10^\circ$ ) угол встречи осей излучателя и приемника. Для возбуждения и приема поверхностно-продольных (головных) волн применяются преобразователи только раздельно-совмещенного типа, так как большой уровень помех в призме полностью маскирует полезные сигналы при включении преобразователя по совмещенной схеме [10].

## 2.6 Иммерсионный преобразователь



Рисунок 11 – иммерсионный преобразователь

Преобразователи для контроля изделия, погруженного в иммерсионную ванну, отличаются от прямых контактных преобразователей тем, что имеют повышенный характеристический импеданс демпфера. Протектор изготавливают из эпоксидной смолы толщиной равной четверти длины волны. Он обеспечивает просветление границы пьзоэлемент – иммерсионная жидкость.

Важным достоинством иммерсионного способа контроля является высокая стабильность акустического контакта. По этой причине предложены различные конструкции преобразователей, которые сохраняют иммерсионную жидкость на месте контакта – локально-иммерсионные преобразователи.

Одна из стенок корпуса такого преобразователя выполняется в виде мембраны, которая препятствует вытеканию жидкости, и хорошо прилегает к неровностям поверхности объекта. Мембрана изготовлена из маслостойкой резины или полиуретана, характеристический импеданс которых близок к импедансу воды, поэтому УЗ – волна практически не отражается от нее.

## 2.7 Характеристики пьезоэлектрического преобразователя

Функция преобразователя это преобразовывать электрические сигналы в механические колебания и механические колебания обратно в электрические сигналы. Большинство факторов, включая материал,

механическую и электрическую конструкцию, и внешние механические и электрические условия нагрузки влияют на поведение преобразователя.



Рисунок 12 – Вид типичного преобразователя

Для того, чтобы получить как можно больше энергии из преобразователя, между активным элементом и поверхностью преобразователя размещают импедансный слой. Оптимальное согласование импедансов достигается путем подборки толщин согласующего слоя так, чтобы его толщина составляла  $\frac{1}{4}$  от требуемой длины волны и чтобы  $z_c = \sqrt{z_1 \cdot z_2}$ . Для контактных преобразователей соответствующий слой выполнен из материала, который имеет акустический импеданс между активным элементом и сталью. Иммерсионные преобразователи имеют данный слой между активным элементом и водой. Контактные преобразователи так же включают износостойкую пластину, которая защищает соответствующий слой и активный элемент от царапин [11].

Демпфер поддерживая кристалл имеет большое влияние на характеристики демпфирования датчика. Использование подложки с импедансом, подобный активному элементу будет производить больший эффект демпфирования. Таким образом преобразователь будет иметь более широкую полосу пропускания, высокую чувствительность и высокую разрешающую способность.

Полоса пропускания связана с диапазоном частот преобразователя. Частота, указанная на преобразователе, является центральной частотой и в основном зависит от материала демпфера. Широкополосные преобразователи будут реагировать на частоты выше и ниже центральной

частоты. Широкий диапазон частот обеспечивает преобразователю более высокую разрешающую способность. Менее демпфированные преобразователи будут иметь и более низкую разрешающую способность, но большую глубину проникновения.

Центральная частота будет так же определять возможности преобразователя. Низкие частоты (0,5 МГц – 2,25 МГц) обеспечивают лучшую проникающую способность в материал, высокие частоты кристаллов (15,0 МГц – 25,0 МГц) обеспечивают меньшую проникающую способность, но хорошую пространственную разрешающую способность [12].

## **2.8 Излучающие поля ультразвуковых преобразователей**

Звук, который исходит от пьезоэлектрического преобразователя, исходит не из точки, а из большей части поверхности пьезоэлектрического элемента. Излучение преобразователя в среду описывается существенно различными закономерностями на близком и далеком расстоянии от преобразователя. В непосредственной близости от него ультразвук распространяется в виде параллельного пучка лучей, но чуть дальше картина резко изменяется. Энергия по-прежнему остается в пределах не расходящегося пучка, но появляются максимумы и минимумы амплитуды (интенсивности). Вся эта область называется ближней зоной или зоной Френеля.

В дальней зоне (зоне Фраунгофера) формируется расходящийся пучок лучей, в форме конуса. Максимум амплитуды соответствует оси преобразователя (акустическая ось или центральный луч). С увеличением угла между направлением какого-либо луча и осью амплитуда уменьшается. За пределами некоторого угла (угла раскрытия) излучение почти не чувствуется. Угол раскрытия определяет направленность излучения.

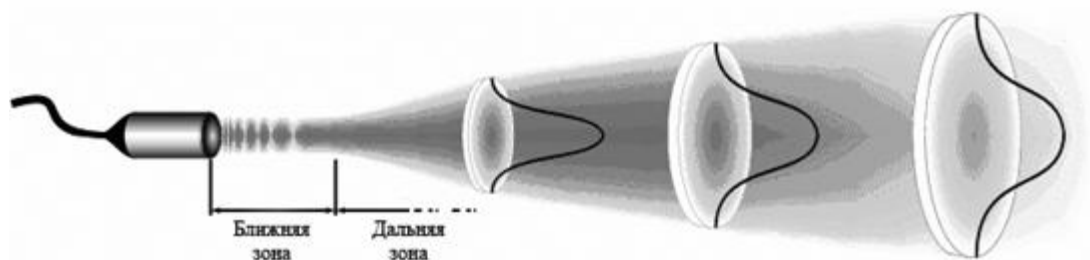


Рисунок 13 – Звуковое поле круглого излучателя

На рисунке 14 (б) схематически изображено поле излучения в ближней и дальней зонах, на рисунке 11 (а) – изменение амплитуды излучения на оси. В ближней зоне амплитуда резко изменяется в зависимости от положения точки в пространстве, а в дальней зоне амплитуда плавно уменьшается с увеличением расстояния от преобразователя. Так же будет изменяться амплитуда сигнала, отраженного от небольшого дефекта [13].

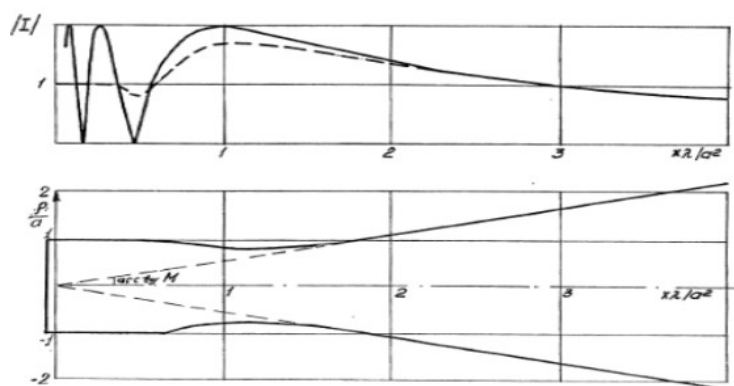


Рисунок 14 – Поле излучения на оси круглой пьезопластины и схематическое изображение поля

### 3 Типы и формирование ультразвуковых изображений

Результатом томографических измерений является массив данных об отражающей способности точек внутренней структуры объекта. Полученный массив в общем случае может быть трехмерным (содержит информацию об отражателях в некотором объеме материала объекта). Технически можно отобразить на экране прибора томограмму любого сечения этого объема, причем ориентация объекта может быть произвольной.

Существует три основных типа эхограмм, которые получили названия А-, В- и С-эхограмм [14].

**А-эхограмма** это самый простой вид получения и представления информации. Зондирование осуществляется при неизменном направлении акустического луча, и на экране монитора отображается А – эхограмма в виде амплитудных значений эхо-сигналов от неоднородностей, находящихся на различных глубинах в пределах луча. Амплитуды фиксируются на экране как функции времени  $t$  или глубины  $L$ , что позволяет информировать исследователя не только о глубине расположения структур, но и об уровне эхо-сигналов от них.

Таким образом, А-эхограмма позволяет найти глубины залегания неоднородностей. Измеренное время  $t$  прихода отраженного сигнала позволяет определить глубину  $h$  залегания соответствующей границе неоднородности:

$$h = \frac{ct}{2} \quad (3)$$

Однако в действительности картина является более сложной, так как на приемник приходят вторично отраженные сигналы, искажающие основную информацию.

Прежде А-режим использовался как дополнительный во всех приборах двумерного изображения, предоставляя возможность анализа амплитудной информации в выбранном луче (акустической строке) помимо яркостной информации об эхо-сигналах. Одной из причин этого является то, что динамический диапазон яркостных сигналов в В-режиме на экране современного прибора вполне достаточен для анализа уровня эхо-сигналов, что достигается за счет большого числа градаций яркости.

**В – режим**, являющийся по существу набором А – режимов для множества прямых, сходящихся в фокусе – излучателе (приемнике).

В общем виде схема получения двумерного акустического изображения представлена на рисунке 15, где показана обобщённая структурная схема УЗ сканера. Входящие в него устройства: датчики, состав электрического блока и устройства регистрации.



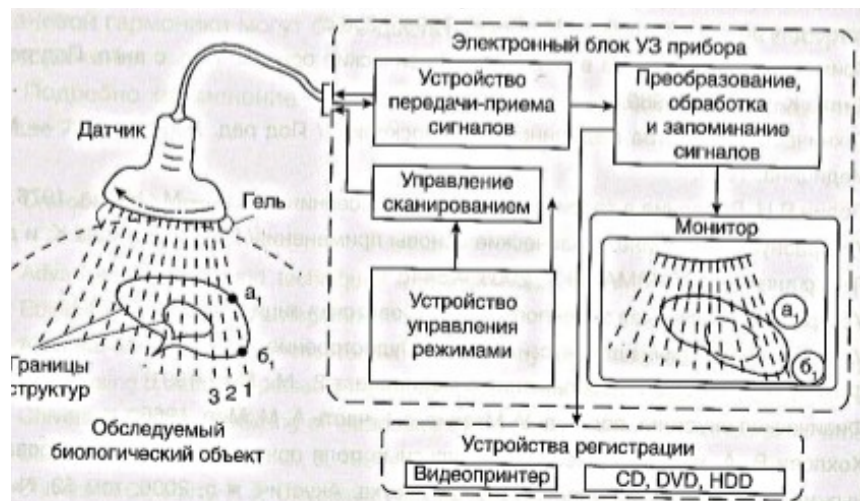


Рисунок 15 – Схема получения двумерного изображения (В – режим)

В начале цикла сканирования, устройство управления сканирования обеспечивает установку передачи-приема сигналов, формирует короткий передающий электрический импульс, который поступает на датчик. В датчике электрический импульс преобразуется в зондирующий акустический импульс.

Сразу же по окончании излучения зондирующего импульса датчик вместе с устройством передачи-приема переходит из режима передачи в режим приема сигналов. Луч на передачу и приемный луч совпадают по направлению и похожи по форме, но в общем случае не обязательно одинаковы, что определенным способом влияет на акустическое изображение. Если на пути зондирующего импульса встречается неоднородности, то часть мощности зондирующего импульса в виде эхо-сигналов отражается от неоднородности в различных направлениях, в том числе и в направлении на датчик.

Эхо-сигналы от неоднородностей принимаются датчиком, преобразуются в электрические импульсы, усиливаются в устройстве передачи-приема и поступают в устройство преобразования, обработки и запоминания сигналов. На выходе этого устройства будут формироваться сигналы которые, будут отображаться на мониторе. Эхо-сигналы отображаются в виде яркостных отметок, их яркость на акустических строках тем больше, чем больше амплитуда принятых эхо – сигналов. Глубину

расположения отражающего образования по оси луча (акустической строке) можно вычислить по формуле:

$$L = \frac{t \cdot c}{2} \quad (4)$$

где  $L$  - расстояние от неоднородности до датчика,

$t$  - интервал времени между началом зондирования и моментом прихода эхо-сигнала,

$c$  - усредненная скорость ультразвука в стали (обычно принимается  $C \sim 5920$  м/с).

Особенностью данного сканирования в то, что оно реализуется либо механическим приводом, либо при помощи электронного управления [15].

**Метод С – сканирования** обеспечивает получение двумерного изображения объекта в прямоугольной системе координат. Главное отличие от метода В – сканирования, при котором одна из координат изображения определяется временем прихода акустического импульса, является то, что при С – сканировании время не относится к числу основных информационных факторов оно определяет лишь расстояние от преобразователя до сканируемой плоскости.

С – режим позволяет реализовать сканирование с постоянной глубиной – на постоянном расстоянии от излучателя. Каждому лучу соответствует точка на экране, яркость которой пропорциональна амплитуде отраженного сигнала. Данный метод таким образом, позволяет построить распределение акустических импедансов на некоторой плоскости, точнее, на сферическом секторе сферы заданного радиуса.

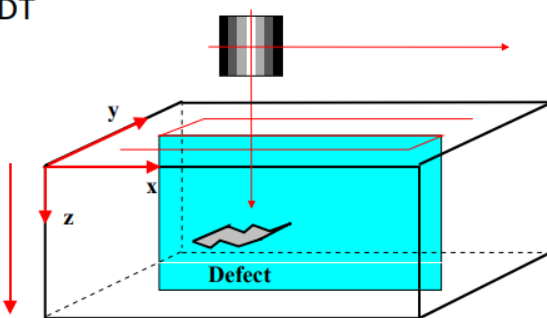
### 3.1 В – scan

Метод В – сканирования, или сканирование с яркостной индикацией дает возможность получать в режиме регистрации отраженного сигнала двумерное изображение сканируемого ОК в плоскости его поперечного сечения. Изображение при В – сканировании формируется в результате

перемещения коллимированного акустического пучка в выбранной плоскости.

Brightness-scan = **B-scan** in NDT

Amplitude Scan:  
A- Scan



Brightness Scan: B- Scan

The amplitude is color coded in a typical B- Scan in a modern NDT imaging system

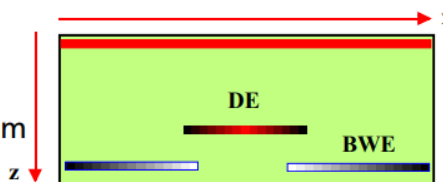


Рисунок 16 – схема B-scan

Отраженные от структурных неоднородностей акустические сигналы образуют на экране монитора строки развертки, соответствующие направлениям распространения ультразвука в контролируемом образце. Отраженные акустические сигналы описывают внутреннюю структуру исследуемого объекта. Элементом таких данных является амплитуда звуковой волны в соответствующей точке.

В стандартном варианте для генерации и приема ультразвука используется один и тот же пьезопреобразователь. Одна из координат, при получении В – изображения пропорциональна времени прихода эхо-сигналов, отраженных от неоднородностей. Время прихода очередного отраженного импульса соответствует глубине залегания соответствующей структуры: эхо-сигналы от структур, расположенных вблизи преобразователя, приходят раньше, чем эхо-сигналы от глубинных структур. Поперечная координата соответствует новому положению преобразователя, которое достигается либо ручным перемещением, либо автоматизированным способом. Процесс сканирования продолжается до тех пор, пока исследуемая область не будет полностью содержаться в растре изображения [16].

Структурная схема простейшей УЗ системы, реализующий метод В – сканирования, представлена на рисунке 17. Посылаемый устройством управления синхроимпульс запускает генератор высоковольтных импульсов. Импульсы поступающие на пьезоэлементы приемно-излучательной системы, в свою очередь генерируют импульсы механической (акустической) энергии. Частота излучения УЗ импульсов, которая задается устройством синхронизации, называется частотой повторения импульсов и обычно лежит в диапазоне 0,5 – 2,5 кГц. Генерируемые УЗ импульсы направляются в исследуемую область. Положение и угловая ориентация УЗ пучка контролируется при помощи электронных систем контроля положения пучка, которые задают положение развертки эхо-сигналов на экране монитора.

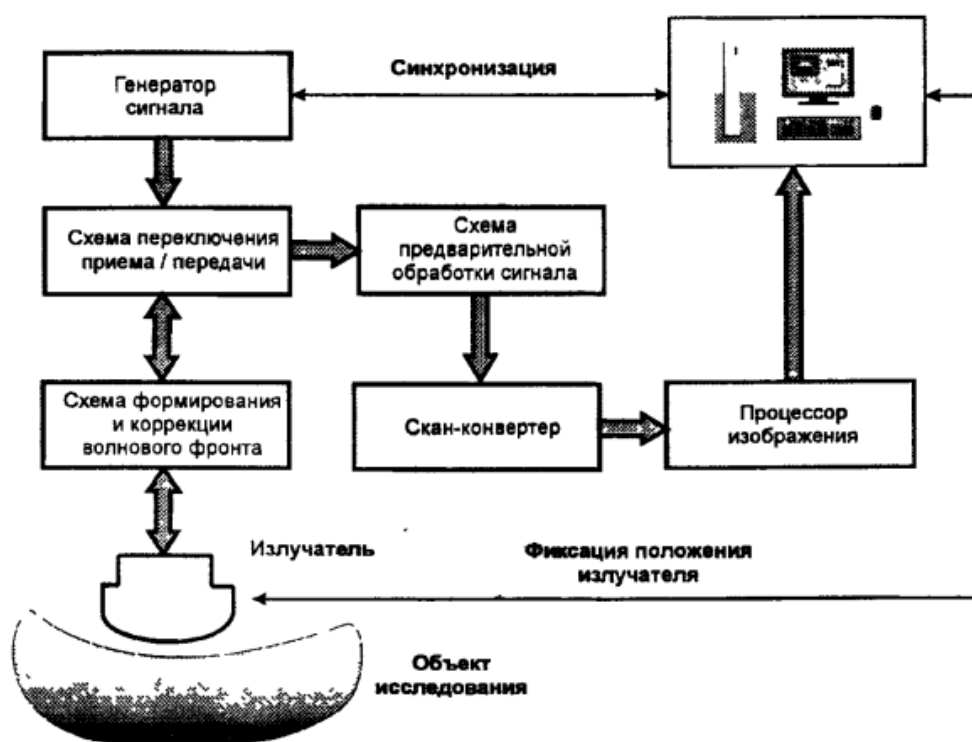


Рисунок 17 – Структурная схема В – сканера.

Современные УЗ сканеры оснащены быстродействующими электронными схемами переключения, позволяющими осуществлять защиту высокочувствительного приемного тракта от воздействия мощных импульсов, поступающих с выхода генератора сигнала на элементы приемно-излучательной системы. Эти схемы обеспечивают так же более эффективное согласование электрических импедансов преобразователей и

усилителя приемной цепи по сравнению с применявшимися ранее диодными схемами переключения.

Акустические сигналы, отраженные от структур, расположенных по траектории УЗ пучка, возвращается на преобразователь и трансформируются в электрические сигналы, которые потом поступают на вход схемы предварительной обработки. Эта схема включает блоки предварительного усиления, фильтрации и детектирования сигнала, устройства регулировки коэффициента усиления и компенсации динамического диапазона. Важной функцией схемы предварительной обработки является регулировка коэффициента усиления для компенсации поглощения сигнала в материале.

Важной составной частью современного В – сканера является процессор изображения, который располагается между скан-конвертором и монитором и реализует различные алгоритмы цифровой обработки изображений, позволяющих обеспечить более достоверную интерпретацию диагностических УЗ изображений.

Среди главных требований к приборам можно отметить высокие значения разрешения и чувствительности приемно – излучательной системы, высокую точность пространственного сканирования, малые искажения изображений, точность и воспроизводимость операций обработки сигналов изображения [17].

### **3.2 Визуализация полученных данных при помощи алгоритма В – развертки**

Методы визуализации, которые применяются в дефектоскопии, основаны на обработке результатов измерений физических параметров акустических полей после их взаимодействия с несплошностями (рисунок 18). По этому признаку их можно разделить на когерентные, в которых используется амплитудная, фазовая, временная и пространственная характеристики поля, и некогерентные, в которых фазовая информация не используется.

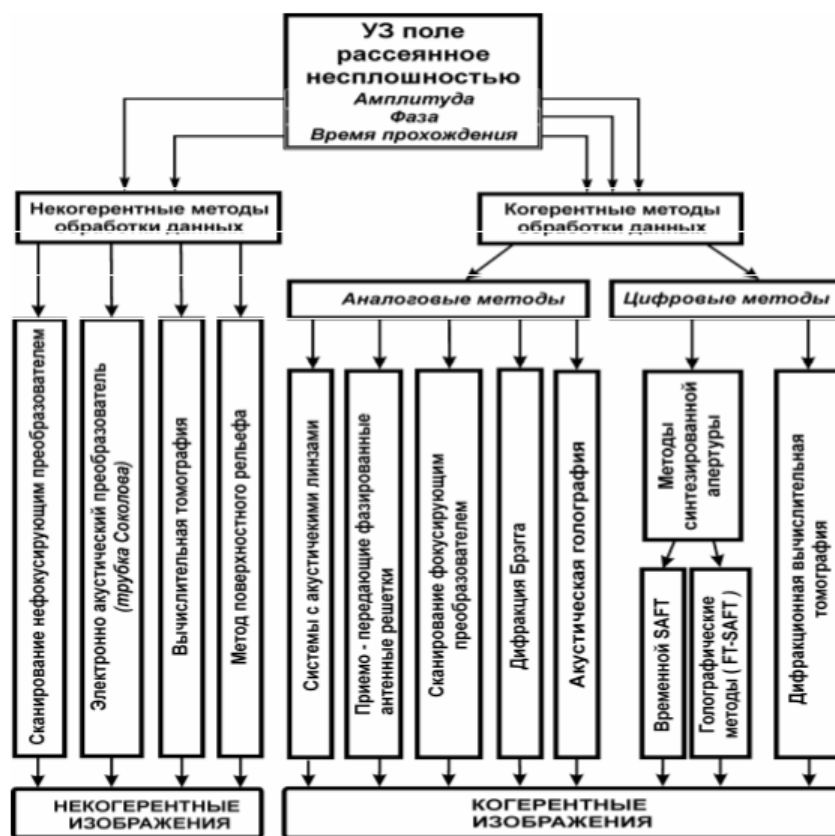


Рисунок 18 – Классификация методов визуализации внутреннего объема объекта по признаку обработки данных.

Подчеркнем, что в некогерентных методах, получают изображение квадрата амплитуды поля рассеянного несплошностью в области регистрации. В когерентных – за счет дополнительной обработки данных (аналоговой или цифровой), получают изображение амплитуды (или квадрата амплитуды) поля в области залегания рассеивателей.

При визуализации каждая точка изображения отображается определенным цветом, соответствующим значению изображения. Из оптики известно, что понятие цвета включает 3 независимые составляющие (чаще всего интенсивности красного, зеленого и синего цветов), при равенстве которых изображение не будет цветным (говорят, что изображение является черно-белым, хотя более грамотно употреблять термин “изображение с оттенками серого”). Особенность большинства акустических изображений заключается в том, что они должны визуализировать одну функцию (так называемую функцию неоднородности), т. е. содержать только одну

составляющую. Поэтому при построении систем визуализации акустических изображений следует учитывать ряд специфических особенностей [18].

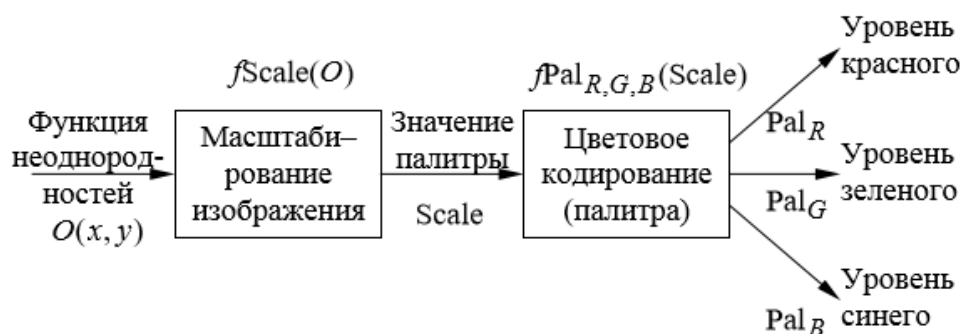


Рисунок 19 – Схема визуализации акустических изображений.

Рассмотрим структуру операций, осуществляющихся при визуализации акустических изображений, показанную на рисунке 19. Первоначально каждая точка подлежащей визуализации функции неоднородностей  $O(x, y)$  приводится к определенному диапазону значений (эта операция названа масштабированием, а описывающая ее функция —  $fScale$ ). Значение  $Scale$ , формирующееся на выходе блока масштабирования, является входным для следующей операции, называемой цветовым кодированием и описываемой тремя функциями  $fPal_R$ ,  $fPal_G$ ,  $fPal_B$ , отвечающими за интенсивность красной  $Pal_R$ , зеленой  $Pal_G$  и синей  $Pal_B$  цветовых составляющих для данной точки изображения. Для встречающегося на практике дискретного случая совокупность значений трех функций,  $Pal_{R,G,B}$  носит название палитры изображения.

В-сканирование, является двухмерным исследованием (2D), при котором выполняется сканирование срезов, или плоскостей в ОК, в отличие от точечного А-сканирования. Формирование развертки происходит за счет серии эхо-сигналов, полученные в ходе контроля поверхности объекта при помощи перемещения преобразователя. На экране дефектоскопа полученная амплитуда характеризует контрастность изображения, которые соответствуют позициям дефекта. В развертке типа В, существует зависимость амплитуды полученного эхо-сигнала от глубины залегания

дефекта в одном из направлений сканирования. Выделяют 3 вида часто встречающейся палитры:

1. Палитра с оттенками серого.

Для этой палитры  $fPal_R(Scale) = fPal_G(Scale) = fPal_B(Scale) = fPal(Scale)$ , характерно то, что черному цвету будет соответствовать нулевое значение палитры, а белый – её максимальное значение.

2. Псевдоцветовая палитра.

В псевдоцветовой палитре происходит плавное изменение цвета изображения от черного через синий, зеленый и красный к белому.

3. Цветояркостьная палитра.

Цветояркостьная палитра также обеспечивает плавное изменение цвета от черного до белого, однако промежуточные оттенки будут от слабо красных до ярко-оранжевых, переходящих в белый.

Существуют также и другие псевдоцветовые палитры, здесь слово “псевдо” как раз и подчеркивает тот факт, что изображение становится цветным не в силу своей природы, а в силу удобства последующего анализа такого изображения, так как цвет становится признаком, по которому различаются значения функции неоднородностей, причем с гораздо большим контрастом, чем если бы анализировалось изображение с оттенками серого [19].

### **3.3 Алгоритм восстановления изображения среза**

Стандартный алгоритм восстановления изображения среза исследуемого ОК, подразумевает использование различных конфигураций зондирующего импульса, который получил название SAFT (метод синтезированной апертуры).

В алгоритме SAFT используются данные об амплитуде эхо-сигналов и времени их прихода в каждую точку приемной апертуры.

Сущность алгоритма состоит в следующем (рисунок 20). Акустический преобразователь с широкой диаграммой направленности перемещается по поверхности контролируемого объекта. В каждой точке



апертуры сканирования выполняется излучение и прием акустических импульсов. При этом, для каждой точки апертуры  $i$  определяется время  $t_i$  прохождения импульса, отраженного от рассеивателя и, в соответствии с этим временем, строятся сферические поверхности радиусом  $R_i = \frac{1}{2}ct_i$ , где  $c$  – скорость акустических импульсов в материале объекта. Геометрическое место пересечения этих сфер соответствует месту расположения дефекта. По существу, это означает, что регистрируется набор эхосигналов для каждой точки приемной апертуры ( $A$  – сканов), выполняется их фазовая компенсация и суммирование.

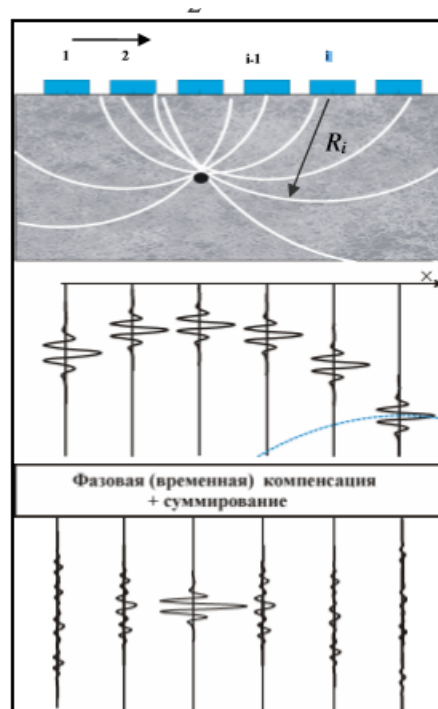


Рисунок 20 – Принцип работы SAFT

Рассмотрим данный алгоритм подробнее:

Пусть  $R_0$  – скалярный точечный излучатель,  $S$  – плоскость регистрации импульса  $f(t)$ . Тогда падающее поле в некоторой точке  $R'$  на рассеивателе будет:

$$u_i(R_0, R', t) = \frac{f\left(t - \frac{|R' - R_0|}{c}\right)}{|R' - R_0|} \quad (5)$$

Представим поле рассеивателя, как совокупность вторичных точечных источников в соответствии с амплитудой падающего поля во время  $t$  как  $\gamma(R')u_i(R', R_0, t)$ , где  $\gamma(R')$  - функция, описывающая рассеиватель. Можем записать поле им рассеянное как:

$$u_s(R, t) = \iiint_{\Omega} \gamma(R') \frac{f\left(t - \frac{|R' - R_0|}{c} - \frac{|R' - R|}{c}\right)}{|R' - R_0| |R' - R|} d^3 R' \quad (6)$$

Согласно принципу Гюйгенса, каждый точечный источник, локализован на рассеивателе  $R_s$  и дает линейный вклад  $u_s^{R_s}(R, t)$  в общее рассеянное поле, формируя диаграммы время – расстояние

$$u_s^{R_s}(R, t) = \frac{f\left(t - \frac{|R_s - R_0|}{c} - \frac{|R_s - R|}{c}\right)}{|R_s - R_0| |R_s - R|} \quad (7)$$

Здесь  $R$  изменяется вдоль поверхности регистрации  $S$  при сканировании. Так как мы считаем, что акустический импульс – короткий, то  $u_s^{R_s}(R, t)$  отлична от нуля

$$t_s = \frac{|R_s - R_0|}{c} + \frac{|R_s - R|}{c} \quad (8)$$

Следовательно, интегрирование  $u_s^{R_s}(R, t)$  вдоль плоскости  $S$  относительно  $R$  для всех времен  $t_s$  позволяет просуммировать все вклады точечных источников, тогда как для любых других точек  $R_s \neq R'$  амплитуды будут меньше  $t_s$  поскольку время распространения импульса

$$t'(R') = \frac{|R' - R_0|}{c} + \frac{|R' - R|}{c} \quad (9)$$

будет иметь только одну общую точку с  $t_s$ . Таким образом, поле  $u(R')$  в области залегания рассеивателя будет:

$$|u(R')| = i$$

Где  $t'(R')$  определяется из (1.5),  $\Omega$  - пространственный угол, под которым видна приемная поверхность  $S$  из области рассеивателя.

Разрешение изображений, полученных с применением алгоритма SAFT – высокое, как у всех методов использующих когерентную обработку,

порядка  $\lambda$  для поперечного и продольного разрешения. Недостатком рассмотренного алгоритма является значительное время получения изображений, что затрудняет его применение в практике.

Обработка получаемых данных заключается в виртуальной фокусировке на каждую точку пространства исследуемой области, где мы хотим получить изображение. Виртуальная фокусировка для каждой точки осуществляется путём введения индивидуальных задержек для сигналов, полученных с каждого элемента приёмопередающего массива датчика, и их последующего сложения. Задержка может быть рассчитана по формуле:

$$\tau = r - \sqrt{((x_p - x_n)^2 + z_r^2)} / c + t_0 \quad (11);$$

Где  $n$ —номер элемента

$R$ —расстояние от точки фокусировки до плоскости, в которой расположены приемо-передающие элементы

$x_n$ —координата элемента массива

$C$ — скорость звука в среде

$t_0$ —произвольная задержка

В результате такой фокусировки формируется диаграмма направленности на приём, которая помимо главного лепестка имеет и побочные, именно их наличие и объясняет появление артефактов в восстановленном изображении. Этот эффект снижается за счёт введения фокусировки во время излучения, тем самым снизив «озвученность» областей вне главного лепестка приёмной диаграммы направленности, и уменьшить таким образом интенсивность артефактов в восстановленном изображении.

Таким образом для снижения шумов при регистрации сдвиговой волны выполняются действия по уменьшению артефактов в восстановленном изображении.

По определению артефакты (от лат. *artefactum* — искусственно-сделанный) — это обнаруживаемые на радиографических снимках ложные

информационно не связанные с ОК элементы изображения в виде полос, теней, линий и т.п.

Методы SAFT имеют хорошее взаимодействие с эхо-методом и эхо-теновым методе, так как они дают больше информации о дефекте [20].

### **3.4 Практическая рекомендация по работе в режиме В – scan**

Специалист УЗ диагностики постоянно сталкивается с проблемами правильного выбора параметров и режимов функционирования УЗ прибора, с помощью которого проводится исследование.

#### **Предварительная настройка изображения.**

Настройка изображения производится после подключения выбранного датчика и включения режима В. На мониторе прибора имеются ручки управления «яркость» (brightness) и «контрастность» (contrast), с помощью которых следует наилучшим образом настроить изображение.

Во многих приборах существуют регулировки, которые позволяют изменять соотношение яркости отображения слабых и сильных сигналов. Это делается с помощью гамма-коррекции (view gamma) амплитуд эхо-сигналов.

#### **Усиление.**

Управление усилением позволяет выбрать наилучший уровень амплитуд наблюдаемых на экране эхо-сигналов. Увеличение усиления повышает яркость всех наблюдаемых сигналов; при этом, в силу ограниченности динамического диапазона прибора, сильные сигналы могут достигнуть максимальной (предельной) яркости, и различия между ними становятся не видны, что затрудняет их наблюдение. Слабые сигналы отображаются на экране также более ярко, одновременно повышается и уровень случайных шумов (характерный мерцающий фон на максимальных глубинах изображения).

#### **Мощность излучения.**

Мощность излучения можно менять в зависимости от глубины расположения области интереса. При этом изменяется и уровень мощности излучаемого датчиком УЗ импульса.

Исходя из соображений безопасности, мощность излучения следует по возможности снижать, если не требуется осуществлять наблюдение на больших глубинах или если затухание на пути распространения ультразвука невелико. Максимальную мощность излучения следует использовать при наблюдении больших глубин, характерных для выбранного датчика с данной рабочей частотой. Когда область интереса находится на меньших глубинах, то лучше всего в этом случае использовать датчик с большой рабочей частотой.

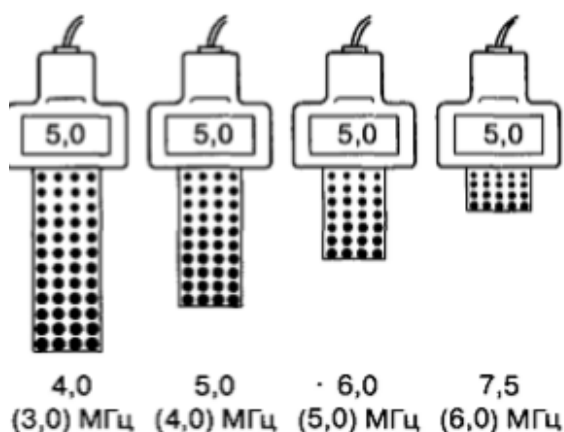


Рисунок 21 – Зависимость разрешающей способности и глубины изображения от выбранной частоты многочастотного датчика. Внизу даны значения частоты для В-режима, в скобках - для доплеровского режима [21].

### 3.5 Описание механизма перемещения

Экспериментальная установка состоит из следующих компонентов:

Преобразователь, механизм перемещения, компьютер, ультразвуковой дефектоскоп.

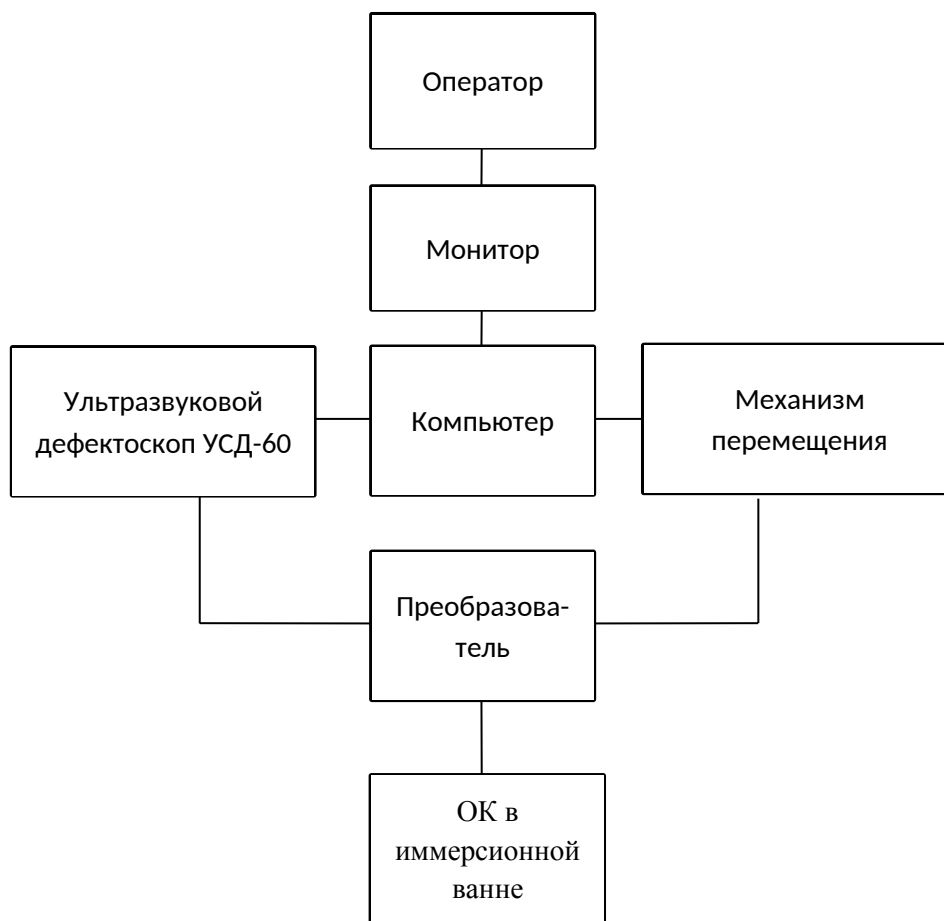


Рисунок 22 – Структурная схема экспериментальной установки

В компьютере с использованием программы «mLaser» задается маршрут перемещения преобразователя в рабочем поле.

Компьютер подает сигнал через сетевой кабель на базовую плату сканирующего устройства «Me-Baseboard», которая перемещает ПЭП по предварительно заданной траектории. Рабочей частью механизма является платформа с ПЭП, перемещающаяся по направляющим осям X и Y.

Принцип действия механизма перемещения заключается в перемещении преобразователя по двум координатам, согласно маршруту в осях x-y. Перемещение осуществляется при помощи блока управления, который посылает сигнал на контроллер, а тот на шаговые двигатели, которые при помощи ременной передачи, так же перемещаются по «рельсам». Каждый шаговый двигатель перемещает таверсу с преобразователем только вдоль одной оси координат.

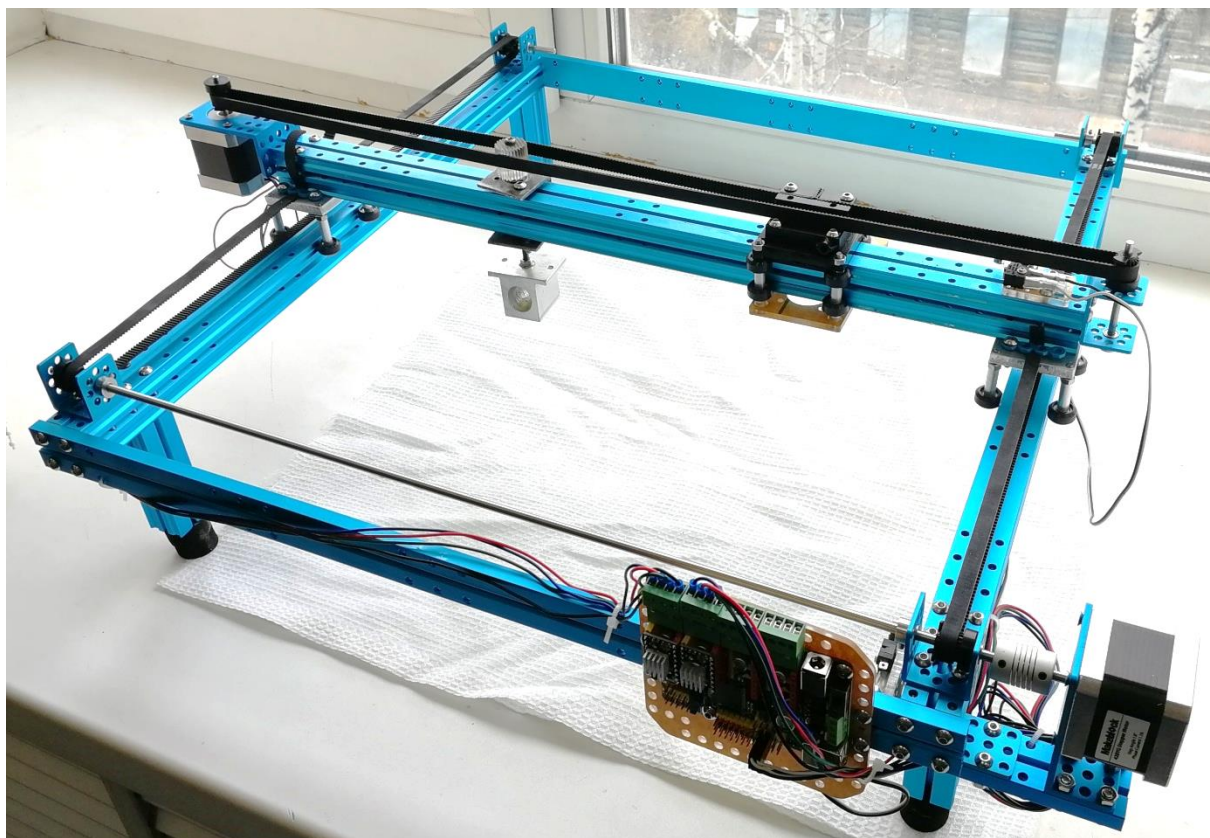


Рисунок 23 – Общий вид механизма перемещения

Сканирующая система состоит из трех основных частей: механизма перемещения, блока управления исполнительными двигателями системы управления.

Блок управления исполнительными двигателями по координатам  $x$  и  $y$  строится по разомкнутому принципу (без использования обратной связи). В этом случае для привода применяются шаговые двигатели.

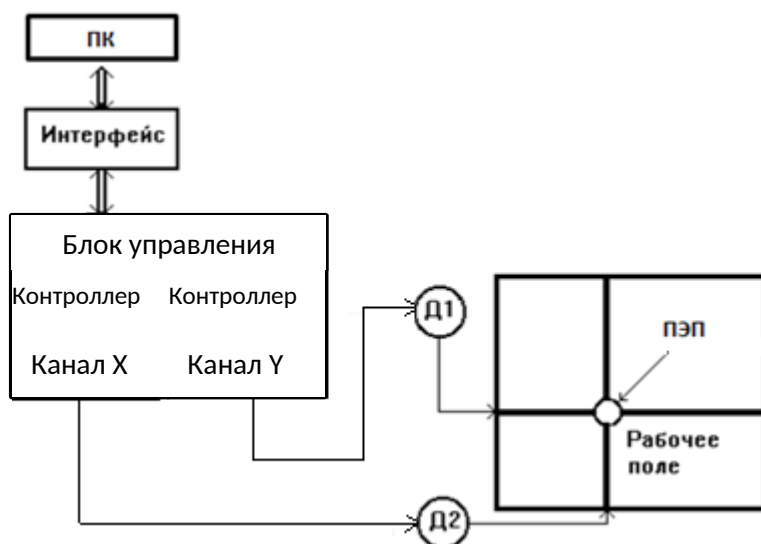


Рисунок 24 – структурная схема экспериментальной установки

Основным узлом установки является рабочее поле – иммерсионная ванна. В рабочем поле перемещается иммерсионный преобразователь. Его перемещение осуществляется с помощью шаговых двигателей: Д2 по оси X и Д1 по оси Y. Управление двигателями осуществляется с помощью блоков “Управление ШД-Y” и “Управление ШД-X”. Блок управления приводом осуществляет интерпретацию команд микро-ЭВМ и преобразование этих команд в электрические сигналы управления шаговыми двигателями.

Связь экспериментальной установки с компьютером осуществляется либо по проводному интерфейсу (последовательный, параллельный порт, USB) либо по беспроводному каналу Ethernet. Микро-ЭВМ установки осуществляет приём через интерфейс команд и данных (графического файла) для управления направлением перемещения.

Процесс формирования данных для маршрута сканирования выполняется цифровыми интерполяторами, которые предназначены для определения координат промежуточных точек, лежащих между заданными узловыми точками.

Преобразователь укреплен на траверсе и перемещается в горизонтальном направлении в рабочем поле – в иммерсионной ванне. Перемещения осуществляются с помощью двух шаговых двигателей, по одному на каждую ось перемещения. С помощью передаточных ремней, закрепленных концами на платформе, вращение оси двигателя преобразуется в линейное движение платформы вдоль «рельс».

Установка обеспечивает высокую точность перемещения преобразователя. С помощью ПК возможно выводить заданный маршрут в виде графического изображения, получаемые в системах автоматизированного проектирования, например в AutoCAD.

При достижении заданной окрестности точек измерительного растра, на аппаратном уровне производится генерирование синхронизирующего импульса для измерительной электроники преобразователя с кодированной информацией о координате.



Высокочастотный преобразователь преобразует импульс электрической энергии в ультразвуковые колебания. Ультразвуковой импульс проходит через масло к стенке объекта контроля, где большая часть энергии импульса отражается обратно в сторону преобразователя. Незначительная часть энергии проходит в стенку и отражается от ее внешней поверхности к внутренней. Небольшая часть энергии передается в масло и движется в сторону преобразователя. Преобразователь принимает два импульса, от внешней и внутренней поверхности объекта контроля. Измерив время запаздывания между импульсами, можно определить толщину контролируемого объекта или обнаружить несплошность.

Таким образом при послойной регистрации нескольких наборов данных, получается томографическое изображение, где каждый из наборов представляет собой запись акустического поля в координатах  $X$  (перемещение преобразователя по координате  $X$ ) – время (рисунок 25)

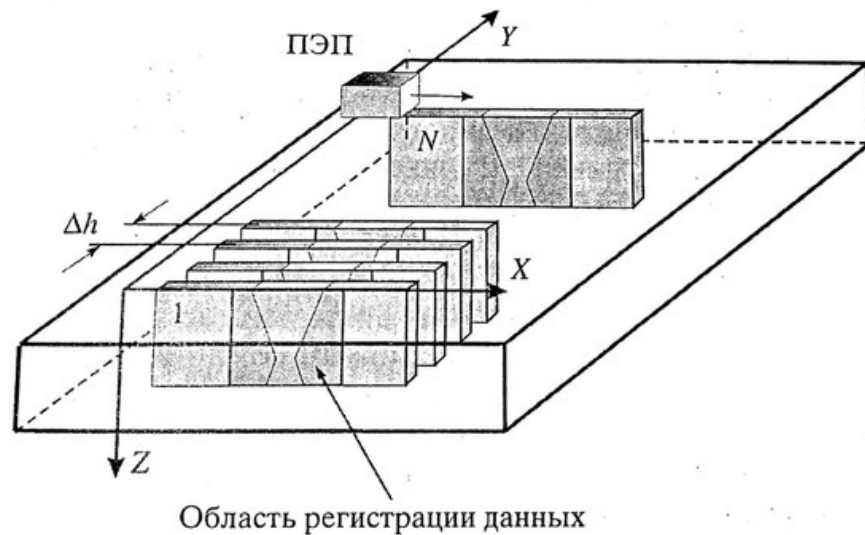


Рисунок 25 – Томографическая схема регистрации данных

### 3.5 Настройка экспериментальной установки

Перед проведением ультразвукового контроля необходимо провести настройку оборудования. В установке используется иммерсионный преобразователь с рабочей частотой 5 МГц.

Для настроек ультразвукового дефектоскопа УСД-60, в меню «ОСНОВНЫЕ» устанавливается скорость звука соответствующая скорости звука, в стальном калибровочном образце – 5920 м/с и задержка в 40.00 мкс.

Для подключения экспериментальной установки к ПК, на ПК необходимо запустить программу «mLaser», в появившемся окне выбрать порт, к которому подключена установка и нажать на кнопку «Connected»

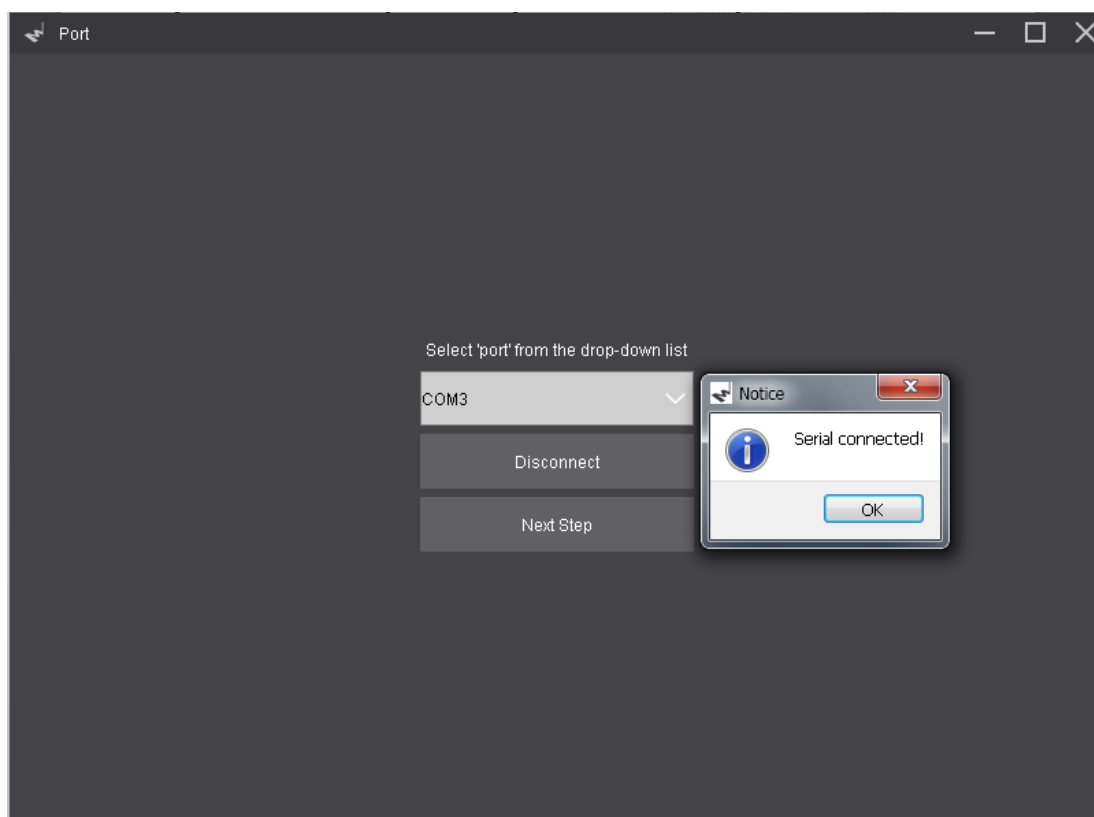


Рисунок 26 – подключение двухосевого сканирующего устройства к ПК

После подключения сканера, необходимо установить преобразователя в начало координат.

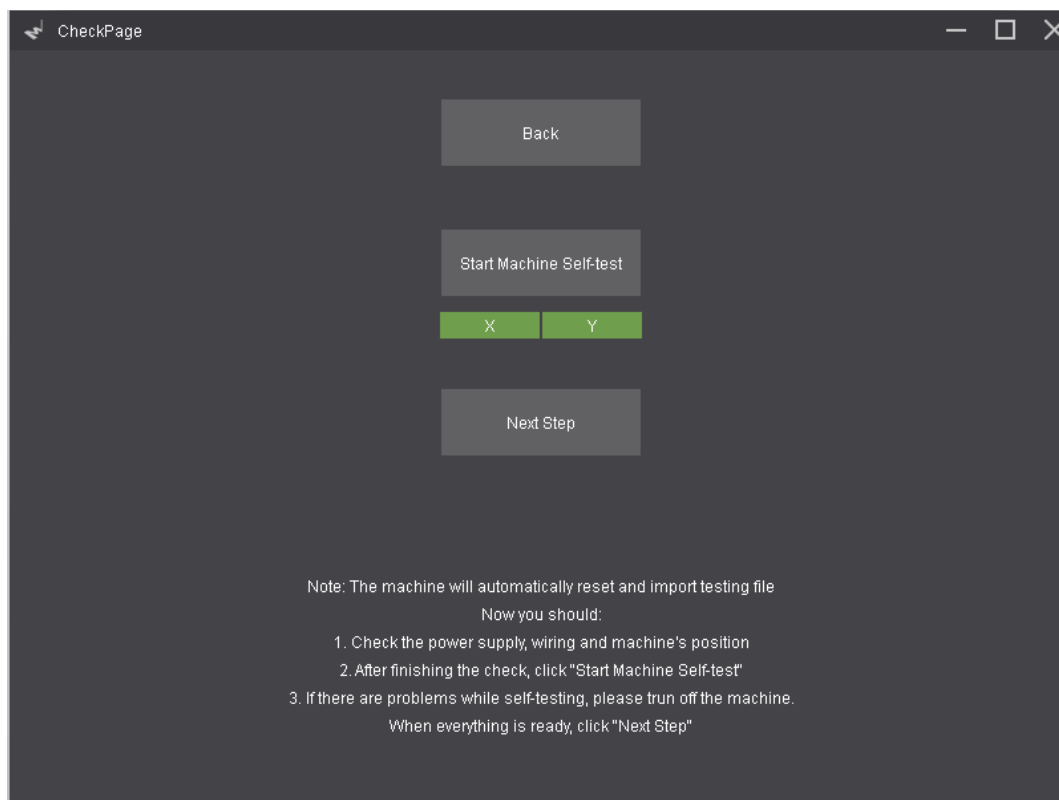


Рисунок 27 – начальная установка

### 3.6 Проведение контроля

Перед началом проведения контроля необходимо проверить наличие необходимых технологических условий:

температура окружающей среды и объекта в диапазоне от минус 5 до плюс 50°C;

- напряжение в питающей сети 220 V плюс/минус 10%;
- чистота обработки контактной поверхности объектов не грубее Rz40.

Для проведения контроля располагаем преобразователь над ОК, предварительно поместив их в иммерсионную ванну.

Для проверки работоспособности и измерения основных характеристик используется стальной калибровочный образец, с пропилами вдоль стенки через различные расстояния друг от друга.

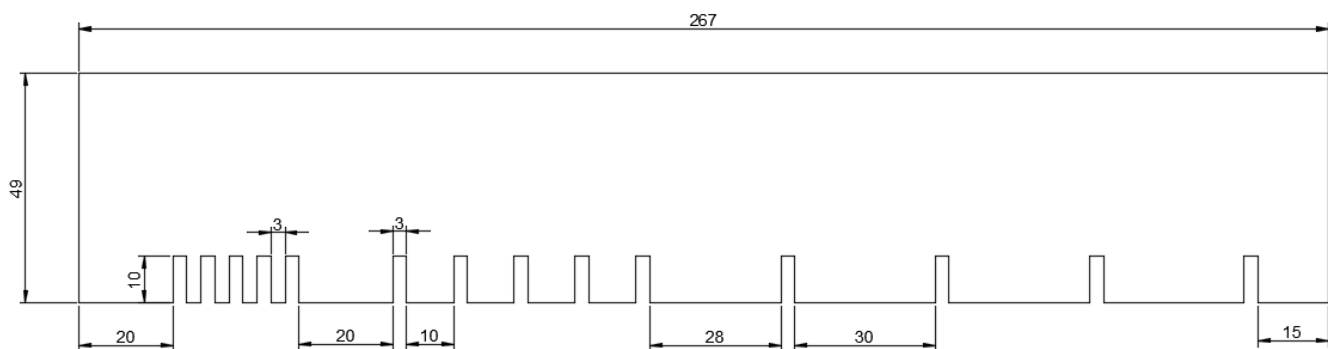


Рисунок 28 – Калибровочный образец

1. При установке ПЭП над калибровочным образцом на участке без отражателей, получаемое А - изображение содержит эхо-импульс от верхней поверхности образца (1) и отражения от дна образца (донный импульс) (2).

Позиция преобразователя 1 на рисунке \_\_

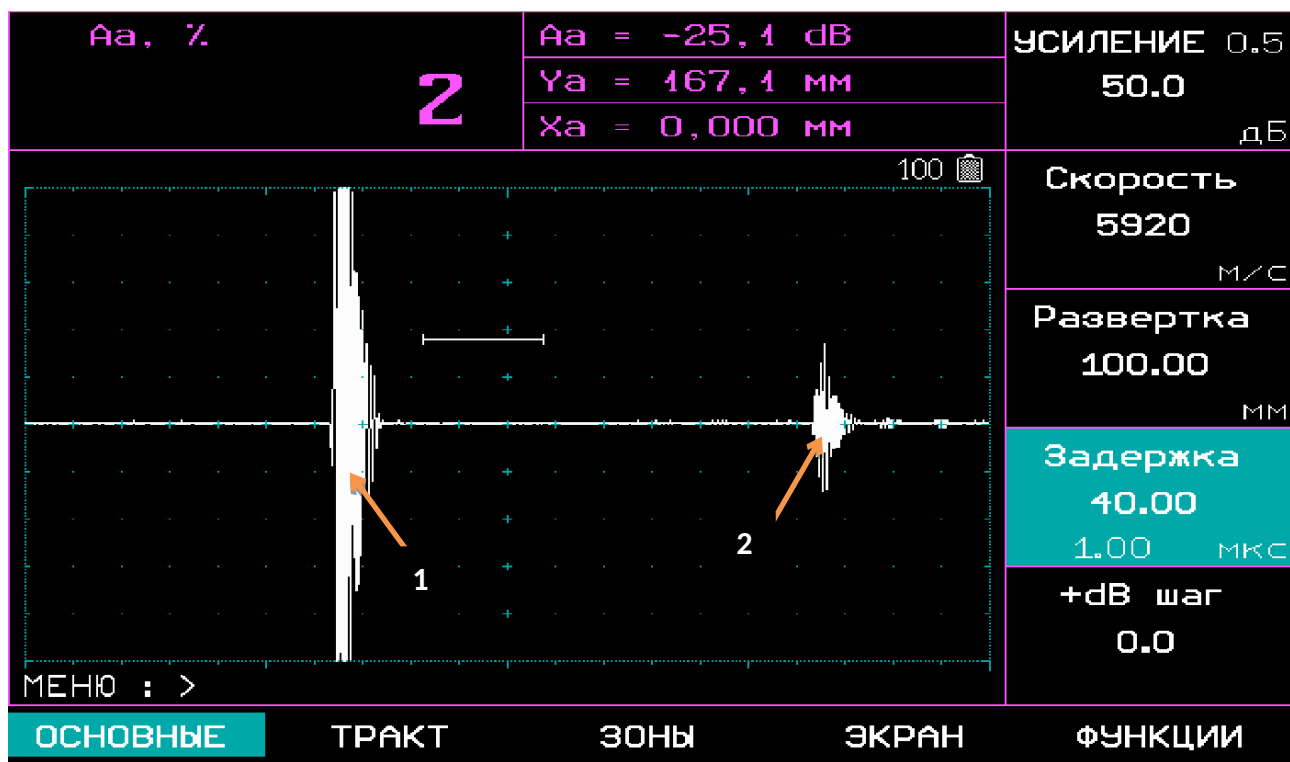


Рисунок 29 – Участок калибровочного образца без отражателей (поз.

1)

2. В позиции 2, на экране дефектоскопа отобразится пропил и дно образца, потому что при отдалении акустической волны от преобразователя, ширина ультразвукового пучка увеличивается. (Рисунок 30, 31)

Рассчитаем ширину УЗ пучка.

$$f=5 \text{ МГц}$$

$$D=12 \text{ мм}$$

Определим  $\lambda$  (длина волны)

$$\lambda = \frac{c}{f} = 1,184 (\text{мм}) (12)$$

где:  $c$  – скорость продольных волн в стали

$f$  – частота ультразвукового преобразователя

Определим ближнюю зону

$$X_{bl} = \frac{a^2}{\lambda} = 30,4054 (\text{мм}) (13)$$

Где  $a$  – радиус преобразователя

Определим угол расхождения фронта УЗ волны

$$Q = \arcsin \left( 0,61 \cdot \frac{\lambda}{a} \right) = 0,120373334 = 6^\circ 53' 49'' \quad (14)$$

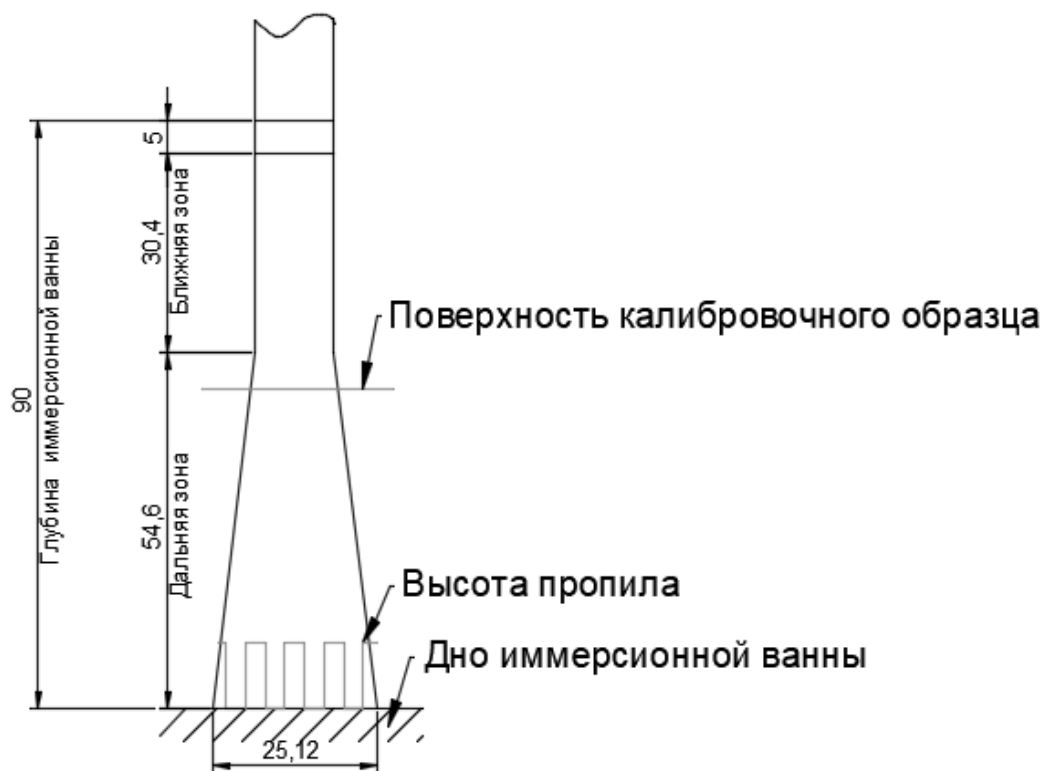


Рисунок 30 – ширина УЗ пучка на дне иммерсионной ванны

В данном случае, ширина пучка составляет 25,12 мм.

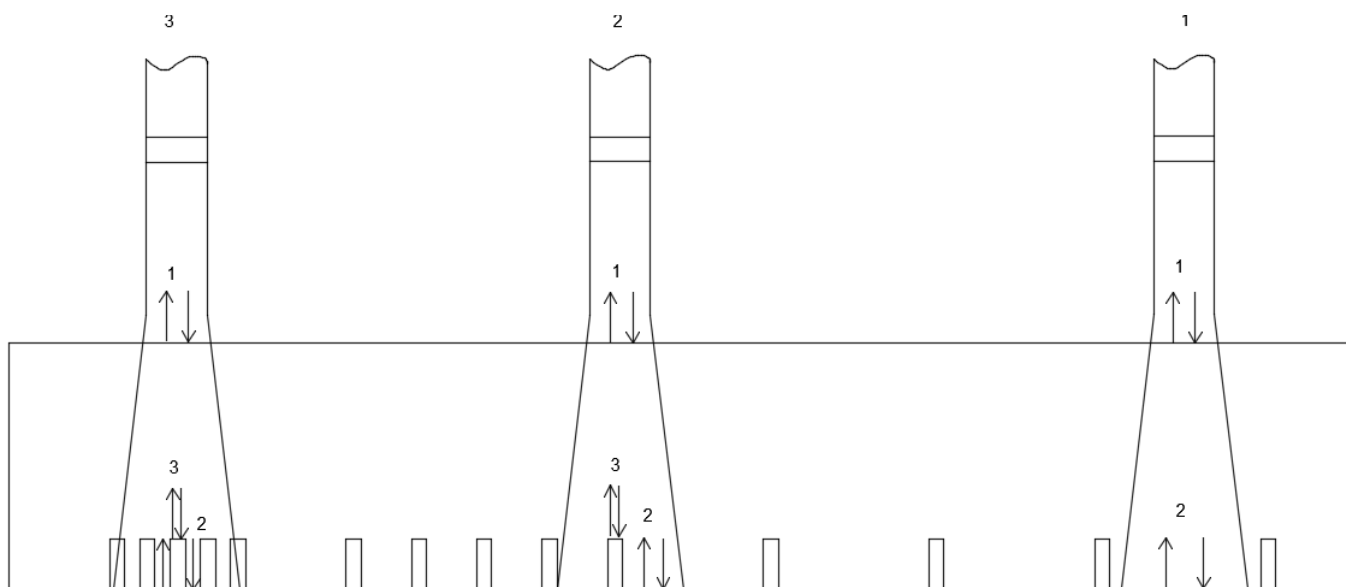


Рисунок 31 – области контроля

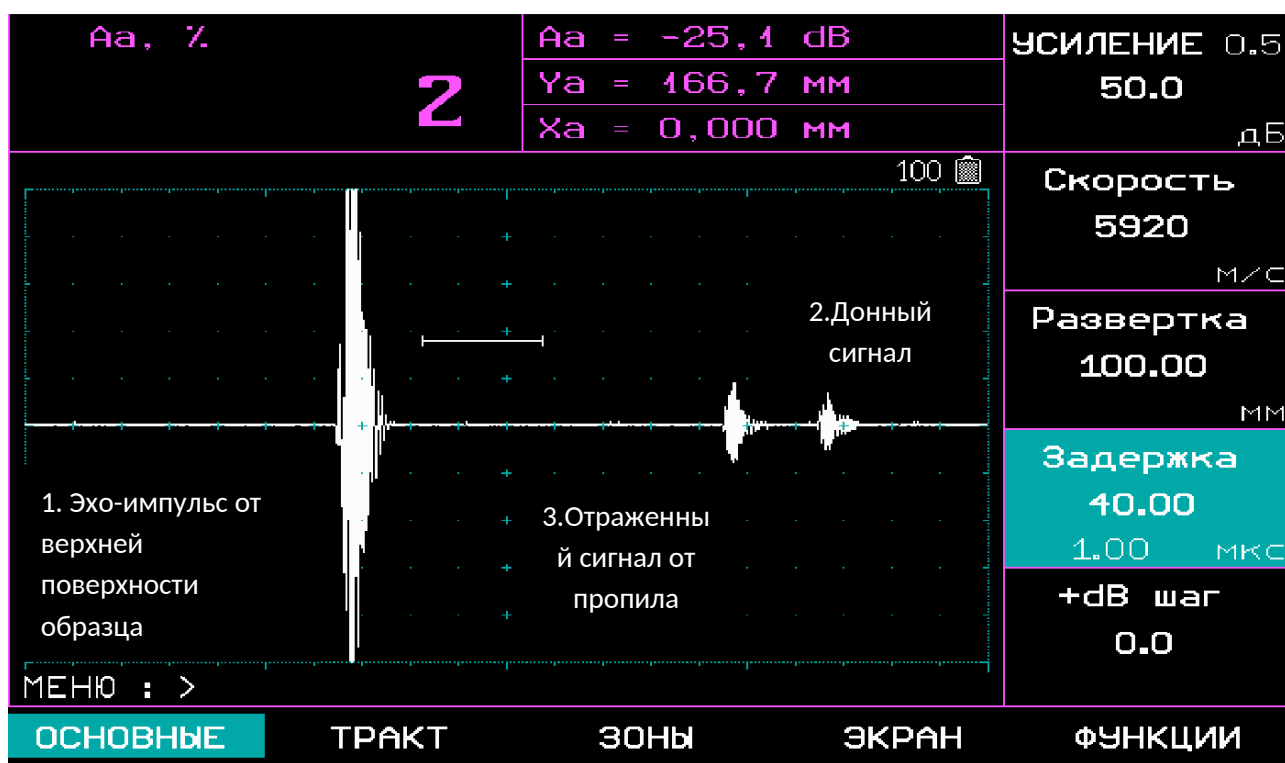


Рисунок 32 – А - эхограмма калибровочного образца с пропилом. Полученное изображение соответствует положению ПЭП в позиции 2.

3. При расположении пропилов близко друг к другу, пьезопреобразователь так же различает пропилы, за счет того, что при движении пьезопреобразователя вдоль образца пропилы поочередно входят в сечение пучка. На экране отобразится следующая картина. (Рисунок 33)

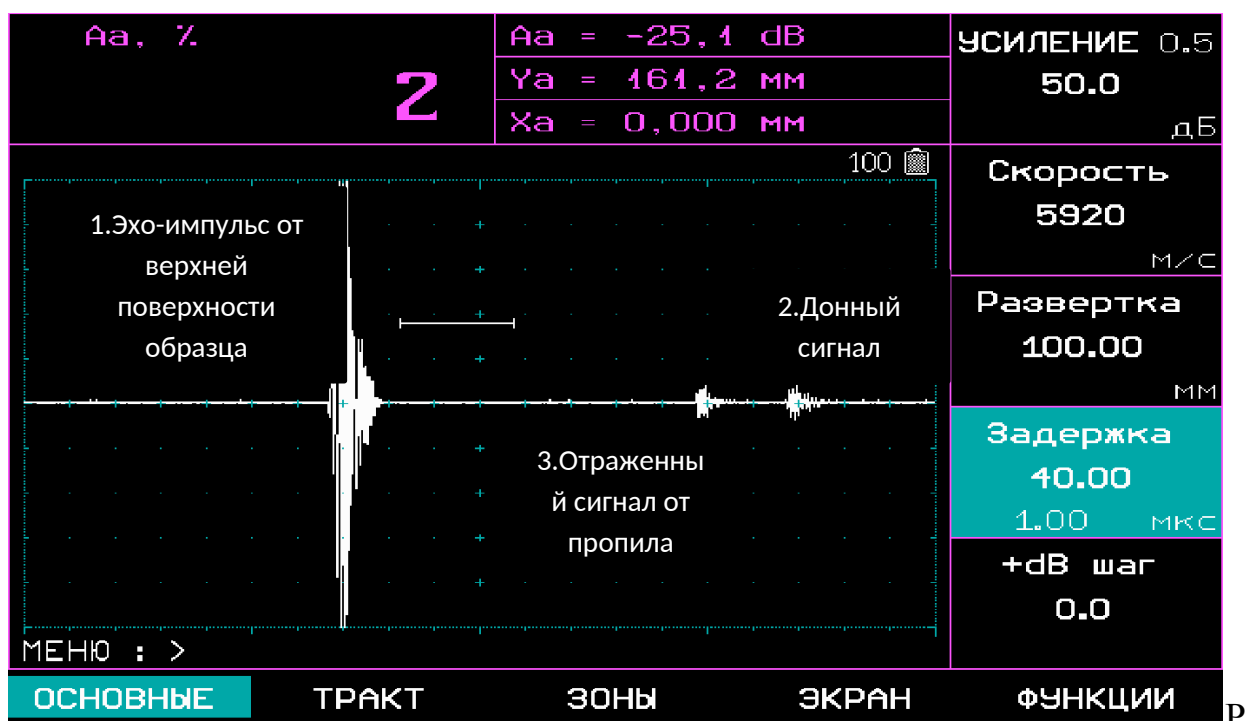


Рисунок 33 – изображение А-развертки калибровочного образца в области близко расположенных пропилов.

Полученное изображение соответствует положению ПЭП в области 3.

По полученным данным из наборов А-scan, получается изображение калибровочного образца в виде В-scan.



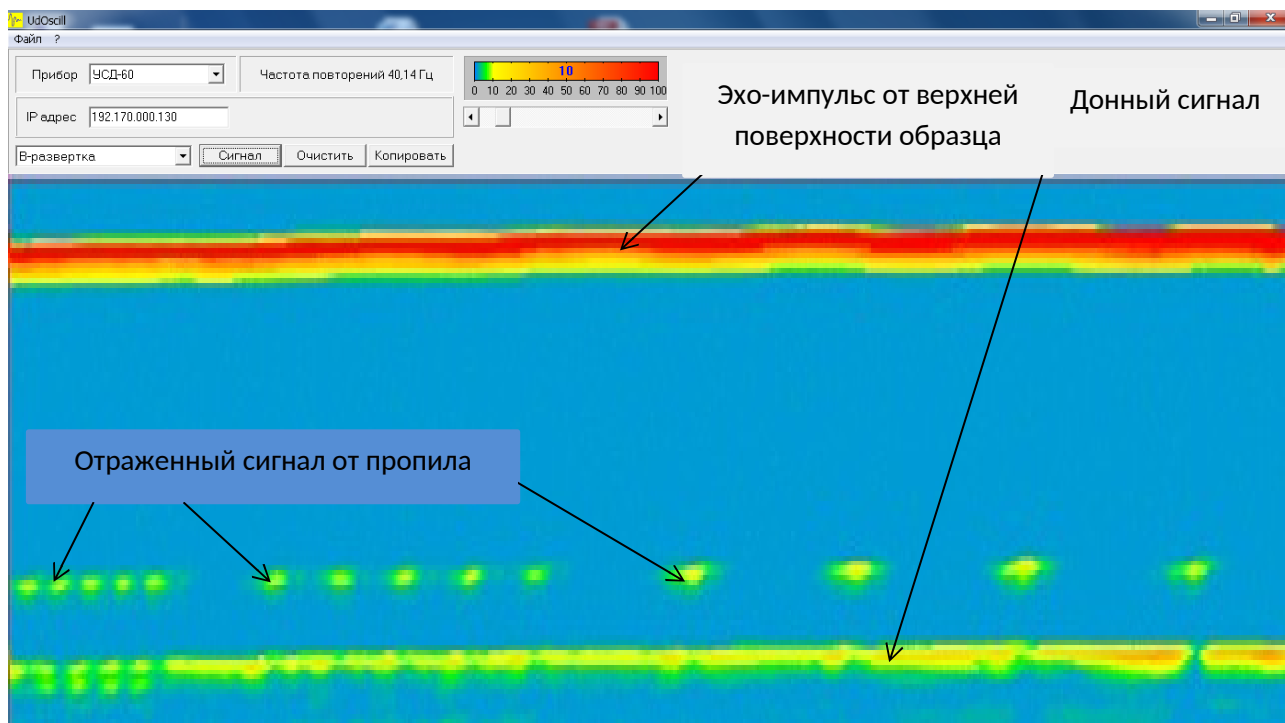


Рисунок 34 – результат проведения контроля на двухосевой экспериментальной установке на основе B-scan.



#### **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Данная выпускная квалификационная работа заключается в разработке аппаратно-программного комплекса для УЗ томографии на основе В-развёртки. Объектом исследования является комплекс ультразвуковой томографии.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

##### **4.1 Технико-экономическое обоснование НИР**

В последнее время ультразвуковая томография нашло широкое распространение в неразрушающем контроле. Следует выделить несколько основных возможных направлений применения систем УЗ томографии, связанных с анализом акустических изображений. Одним из основных направлений продолжает оставаться дефектоскопия, то есть обнаружение дефектов. Важным направлением также является визуализация внутренней структуры объекта. В этом направлении выделяют промышленные приложения, например, серийный контроль изделий, связанные с обеспечением экономической, транспортной и промышленной безопасности.

## **4.2 Анализ конкурентных технических решений**

Основным конкурентом разрабатываемой технологии контроля является система «УКД-1200», производства Научно-Производственного центра «Кропус». Российских аналогов приборов с данной технологией не существует.

Система ультразвукового контроля «УКД-1200» предназначена для поиска дефектов с использованием ультразвукового иммерсионного метода контроля головными и сдвиговыми волнами, на плоских, цилиндрических (боковых), конусных поверхностях, а так же галтельных переходах дисков.

Высокоточная поворотная платформа для установки дисков, позволяет контролировать диски с наружным диаметром до 1200 мм и высотой до 300 мм. Для упрощения загрузки/выгрузки дисков, УКД-1200 поставляется в комплекте с системой слива иммерсионной жидкости.

Информация от измерительной части поступает в реальном времени на управляющую ЭВМ и выводится на экран. Программное обеспечение, работающее под управлением операционной системы Windows, выполняет задачи отображения и регистрации результатов контроля измерительной части установки, ведёт электронный журнал работы установки, а так же сохраняет на жесткий диск результаты УЗ контроля в виде протоколов для дальнейшего просмотра и вывода на печать.

В данной научно-исследовательской работе была разработана установка векторного типа, особенностью которой является то, что преобразователь может перемещаться по двум координатам, что обеспечивает перемещение преобразователя по пространству, согласно маршруту в осях x-y.

Связь экспериментальной установки с компьютером осуществляется либо по проводному интерфейсу (последовательный, параллельный порт, USB) либо по беспроводному каналу Ethernet. Микро-ЭВМ установки осуществляет приём через интерфейс команд и данных (графического файла) для управления направлением перемещения.

Процесс формирования данных для маршрута сканирования выполняется цифровыми интерполяторами, которые предназначены для определения координат промежуточных точек, лежащих между заданными узловыми точками.

Соответственно, отличие экспериментальной установки от УКД-1200 заключается в том, что на данной экспериментальной разработке появилась возможность сканирования не только дисков, но и других деталей различной формы, в связи с тем, что на механизм перемещения можно передать любой маршрут сканирования в координатах x-y.

Таблица 2 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>к1</sub>	Б <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1.Повышение производительности труда пользователя	0,15	3	5	0,45	0,75
2. Удобство в эксплуатации	0,1	4	5	0,4	0,5
3. Потребность в ресурсах памяти	0,05	5	1	0,25	0,05
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,05	4	4	0,2	0,2
5. Простота эксплуатации	0,2	3	5	0,6	1
6. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,2	5	4	1	0,8
Экономические критерии оценки эффективности					
Цена	0,2	3	5	0,6	1
Конкурентоспособность продукта	0,05	4	4	0,2	0,2
Итого	1			3,7	4,5

Бк1 – баллы конкурентной системы;

Бф – баллы разрабатываемой системы.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i(15)$$

Система ультразвукового контроля «УКД-1200» предназначена для узкоспециализированных задач (дефектоскопия заготовок авиационных дисков). Данная система производит контроль изделий в виде дисков диаметром до 1200мм, с толщиной от 6 до 300мм и массой не более 300 кг. Так же отличительной чертой данной системы является то, что тут происходит вращение самого ОК – диска.

Технология, которая зарабатывалась в данной НИР направлена на создание автоматизированной системы неразрушающего контроля изделий с использованием иммерсионной ванны, вне зависимости от геометрической формы ОК, так как одним из главными преимуществами является: перемещение преобразователя в двух осях, осуществление маршрута контроля любой сложности. Применение данной системы дает хорошие результаты с точки зрения объективности обнаружения дефектов, определении их координат, условной протяженности и эквивалентных размеров.

Разрабатываемая технология будет пользоваться спросом так как, подобного оборудования в промышленной области, не было выявлено.

#### **4.3 Планирование работ по научно-техническому исследованию**

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведено распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.

Работу выполняло 2 человека: руководитель, студент-дипломник

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Таблица 3. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор агрегатов	Руководитель, студент
	3	Выбор направления исследования	Студент
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Подготовка образцов для экспериментов	Руководитель, студент
	6	Проведение экспериментов	Руководитель, студент
Обобщённая оценка результатов	7	Расшифровка данных	Студент
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Руководитель, студент

Определение трудоемкости этапов НИР

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{mini} + 2t_{max\ i}}{5}, (16)$$

где  $t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_r$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, (17)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### **4.4 Разработка графика научного исследования**

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (18)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (19)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 28} = 1,56$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ  $T_k$  нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Временные показатели проведения научного исследования

№ (название)работы	Исполнители	Продолжительность работ				
		tmin, чел- дни	tmax, чел- дни	тожi , чел- дни	Tpi , раб.дн	Tki , кал. Дн
Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, студент	2	2	2	1	2
Выбор направления исследований	Студент	5	11	5	5	8
Календарное планирование	Научный руководитель	1	2	1	1	2

работ по теме						
Подбор и изучение материалов по теме	Студент	3	6	3	3	5
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Научный руководитель, студент	10	12	10	5	10
Проведение экспериментов	Научный руководитель, студент	11	12	11	5	10
Определение целесообразности	Научный руководитель, студент	10	13	11	5	10
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическим и исследованиям и	Научный руководитель, студент	7	8	5	2	4
Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент	10	11	10	5	10
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-	Студент	8	10	10	5	16



технической документации)						
Итого						77

На основе таблицы 4 построен календарный план-график в виде диаграммы Ганта представленной в таблице 5. График построен для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта за период времени дипломирования.

Составлен план НИР, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 10 позиций. Для построения таблицы временных показателей проведения НИР был рассчитан коэффициент календарности. С помощью данных показателей был разработан календарный - план график проведения НИР по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, что указывает на целесообразность проведения данного исследования.

Таблица 5 – Календарный план-график проведения НИР

Вид работ	Исполнители	Тки кал. дн	Продолжительность выполнения работ														
			Янв			Февр			Март			Апр			Май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	2															
Выбор направления исследований	Студент	8															
Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель	2															
Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, Студент	5															
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент	10															
Проведение экспериментов	Научный руководитель, студент	10															
Определение целесообразности проведения	Научный руководитель, студент	10															

Сопоставление результатов экспериментов с теоретическим и исследованиям и	Научный руководитель, студент	4								
Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент	10								
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент	16								

#### 4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы; - дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

#### 4.6 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса. Производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований);

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i + N_{расх\ i} \quad (20)$$

где:  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расх\ i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

kT – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента (kT), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 6.

Таблица 6 – Материальные затраты

Наименование	Единицы измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты на материалы
Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60	шт	1	320 тыс.	320 тыс.
Механизм перемещения	шт	1	32 622 руб	32 622 руб
ПК	шт		25 тыс	25 тыс
Сетевой кабель	Шт	1	200 руб	200
ПЭП	Шт	1	2200	2200
Масло	л	5	800	4000
Эмиссионная ванна	шт	1	350	350
Итого				384 372

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов. Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, теплоносителей и других видов материальных ресурсов, образовавшиеся в процессе производства научно-технической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса (химические или физические свойства) и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению

#### 4.7 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп} \quad (21)$$

где:  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $З_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $З_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = T_p \cdot З_{\partial} \quad (22)$$

где:  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ;

$З_{\partial}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\partial} = \frac{З_m \cdot M}{F_{\partial}} \quad (23)$$

где:  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 22 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

Фд – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн..

Таблица 7 – Баланс рабочего времени

Показатель рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	132	132
- выходные		
- праздничные		
Потери рабочего времени	32	32
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	201	201

Месячный должностной оклад работника:

$$З_M = З_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p (24)$$

где: Зтс – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

кпр – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Зтс);

кд – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от Зтс);

кр – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата Зтс находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда Тс1 = 600 руб. на тарифный коэффициент кт и учитывается по единой для бюджетных организаций тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 8.

Таблица 8 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Зтс, тыс. руб.	кпр	кд	кр	Зм, руб	Здн, руб	Тр, раб. дн	Зосн, руб.	Здоп , тыс.
Руководитель	28943	0,3	0,5	1,3	67725	3512	33	11589	17384
Студент	2400	0,3	0,5	1,3	5616	292	63	18396	2759,4
Итого								13429	20143,
								2	4

### Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} \quad (25)$$

где:  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 9.

Таблица 9 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	384 372	Пункт 3.4.1
2. Затраты на спецоборудование для		Пункт 3.4.2



научных работ		
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	134 292	Пункт 3.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20 143,40	Пункт 3.4.4
5. Бюджет затрат НТИ	538 807,40	

Вывод:

По полученным результатам расчета можно сделать вывод, что данный проект имеет хорошие функциональные показатели и при этом возможно использование в широком спектре отраслей.

В экономическом разделе выпускной квалификационной работе было проведено планирование и составлены графики научно технического исследования. Всего требуется 77 рабочих дней на реализацию научно технического исследования. Составлена смета затрат на научно техническое исследование. Проведен расчет основной и дополнительной заработной платы, а так же расчет материальных затрат. Величина затрат на реализацию НТИ составила 538 807,40 рублей.